

Universidad Pública de Navarra

Nafarroako Unibertsitate Publikoa

ESCUELA TECNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRONOMOS

*NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKO*

(TITULO DEL TFM/MALaren IZENBURUA)

**Detección de cortas forestales mediante técnicas de detección de cambios
aplicadas a imágenes Sentinel-2/Sentinel-2 irudiei aplikatutako tekniken bidezko baso
mozketen detekzioa**

presentado por

(NOMBRE Y APELLIDOS DEL AUTOR/IZENA ETA ABIZENAK)

Patricia Estivariz Rioja (e)k

aurkeztua

MÁSTER EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TELEDETECCIÓN
MASTERRA INFORMAZIO SISTEMA GEOGRAFIKOETAN ETA TELEDETEKZIOAN

Mes, Año / Urtea, hilabetea

Septiembre,2017/2017ko Iraila

ÍNDICE GENERAL

1. RESUMEN	9
1.1 PALABRAS CLAVE	9
1.1 KEYWORDS	9
2. INTRODUCCIÓN.....	10
2.1 OBJETIVOS.....	14
3. MATERIALES Y ZONA DE ESTUDIO.....	15
3.1 ZONA DE ESTUDIO.....	15
3.2 MATERIALES	18
3.2.1 SENTINEL-2 2	18
3.2.2 ARCHIVOS CORTAS FORESTALES	21
4. METODOLOGÍA	23
4.1 PRE-PROCESO.....	23
4.1.1 SEN2COR.....	23
4.1.2 REMUESTREO	24
4.1.3 METADATOS	25
4.1.4 RECORTAR	25
4.2 ÍNDICES DE VEGETACIÓN	26
4.3 TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS.....	29
4.3.1 COMPOSICIONES MULTITEMPORALES	29
4.3.2 DIFERENCIA DE IMÁGENES.....	30
4.3.4 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.....	31
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
5.1 ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS	33
5.1.1 ÍNDICES DE VEGETACIÓN	33
5.1.2 COMPOSICIONES MULTITEMPORALES	38

5.1.3 DIFERENCIA DE IMÁGENES.....	44
5.1.4 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.....	55
5.2 ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES DIFERENCIA	60
5.3 SELECCIÓN DEL MÉTODO ÓPTIMO Y DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS DE TALA	63
5.3.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS: SELECCIÓN DEL MÉTODO ÓPTIMO.	63
5.3.2. DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS DE TALA PARA SU ESTUDIO.....	66
5.4 CÁLCULO DE ESTADÍSTICAS GENERALES DE LAS ZONAS DE TALA	67
5.5 ESTUDIO DE DIFERENTES ÍNDICES EN ESPECIES	69
5.5.1 ANÁLISIS GENERAL DE LOS IV POR ESPECIES.	71
5.6 ESTUDIO CON LA PENDIENTE.....	71
5.6.1 ANÁLISIS GENERAL DE LOS IV POR PENDIENTES.....	72
6. CONCLUSIONES	73
7. BIBLIOGRAFÍA	76
8. ANEXOS	84
8.1 ANEXO 1: TABLA DE ESTADÍSTICAS DE LOS IV POR ESPECIE.....	84
8.2 ANEXO 2: TABLA DE ESTADÍSTICAS DE LOS IV POR PENDIENTE.	86
8.3 ANEXO 3: ESTUDIO DETALLADO DE LOS ÍNDICES POR ESPECIES	87
8.3.1 NDVI.....	87
8.3.2 RENDVI	88
8.3.3 NDII.....	89
8.3.4 SAVI.....	90
8.4 ANEXO 4: ESTUDIO DETALLADO DE LOS ÍNDICES POR PENDIENTES.....	91
8.4.1 NDVI.....	91
8.4.1 RENDVI	92
8.4.3 NDII.....	93
8.4.4 SAVI.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 : Delimitación de la zona de estudio en Guipúzcoa.	16
Figura 2 : Delimitación más detallada de la zona de estudio en Guipúzcoa.....	17
Figura 3: MDT del terreno.	17
Figura 4: Mapa de orientaciones del terreno.	17
Figura 5: Mapa de pendientes reclasificado.	18
Figura 6: Bandas de Sentinel-2.	19
Figura 7: Imagen Sentinel-2 4 de mayo.....	20
Figura 8: Imagen Sentinel-2 23 de junio.	21
Figura 9: Imagen Sentinel-2 19 de abril..	21
Figura 10: Imagen Sentinel-2 18 de junio.	21
Figura 11 : Imagen de la zona con las cortas del archivo (izq.)& cortas del archivo mayores de 0,5 ha. (drcha.)	23
Figura 12 : Imagen recortada sobre el contorno del País Vasco.....	26
Figura 13: Histograma que presentan las imágenes diferencia (fuente: Gonzalez, 2016)	30
Figura 14: Procedimiento de calculo de los CP (Audicana,2016).....	32
Figura 15: Histogramas del NDVI para abril 2016, junio 2016, abril 2017 u junio 2017 (de izquierda a derecha y de arriba a abajo).	33
Figura 16: Histogramas del RENDVI para abril 2016, junio 2016, abril 2017 u junio 2017 (de derecha y de arriba abajo).	33
Figura 17: Histogramas del NDVI para abril 2016, junio 2016, abril 2017 u junio 2017 (de izquierda a derecha y de arriba abajo).....	34
Figura 18: Histogramas del SAVI para abril 2016, junio 2016, abril 2017 u junio 2017 (de izquierda a derecha y de arriba abajo).....	34
Figura 19: Histogramas de los IV superpuestos para junio de 2017.....	35
Figura 20 :Gráfico de los valores medios de los IV.	36

Figura 21 :Gráfico de los valores máximos de los IV.....	36
Figura 22: Gráficos de correlaciones entre IV.....	37
Figura 25: Imagen de cambios abril banda NIR.....	39
Figura 27: Imagen de cambios NDVI abril.	39
Figura 29: Imagen de cambios RENDVI abril.	39
Figura 30: Imagen de cambios RENDVI junio.	39
Figura 31 : Imagen de cambios NDII abril.	40
Figura 32 : Imagen de cambios NDII junio.	40
Figura 33: Imagen junio 16 pre-tala.....	40
Figura 34: Imagen junio 17 post-tala.....	40
Figura 35: Imagen detalle de cambios abril banda SWIR.	40
Figura 36: Imagen detalle de cambios junio banda SWIR.....	40
Figura 37: Imagen detalle de cambios abril banda NIR.	41
Figura 38: Imagen detalle de cambios junio banda NIR.....	41
Figura 39 : Imagen detalle de cambios NDVI abril.	41
Figura 41 : Imagen detalle de cambios RENDVI abril	41
Figura 42: Imagen detalle de cambios RENDVI junioz	41
Figura 43 : Imagen detalle de cambios NDII abril.	42
Figura 44 : Imagen detalle de cambios NDII junio	42
Figura 45:Imagen detalle abril 16 (izquierda) -abril 17 (derecha).	43
Figura 46 :Imagen detalle junio 16 (izquierda) -junio 17 (derecha).....	43
Figura 47 : Imagen detalle composición NDVI abril (izquierda) -NDVI Junio(derecha).	43
Figura 48: Imagen detalle composición RENDVI abril (izquierda) -RENDVI Junio(derecha).	44
Figura 49: Imagen detalle composición NDVI abril (izquierda) -NDVI Junio(derecha).	44
Figura 51: Imagen abril 16 pre-tala.(izquierda), junio 16 pre-tala (derecha).	45
Figura 52 : Imagen abril 17 post-tala(izquierda), junio 17 post-tala (derecha).	45
Figura 53 : Imagen detalle de diferencia abril (izquierda) junio (derecha).....	45

Figura 54: Histograma y umbral 1 de imagen diferencia SWIR	46
Figura 56: Imagen SWIR de detalle con los píxeles de cambio enmascarados (izq.) & imagen de cambios original (drch.)	47
Figura 57: Histograma y umbral 2 de imagen diferencia SWIR	47
Figura 58: Imagen de junio16 (izquierda), junio17 (centro), imagen de cambio (derecha).....	47
Figura 59: Imagen diferencia NIR (izquierda)/ Imagen diferencia SWIR (derecha)	48
Figura 60: Imagen detalle diferencia NIR (izquierda)/ Imagen diferencia SWIR (derecha).....	48
Figura 61 : Histograma y umbral de imagen diferencia NIR	49
Figura 62 :Imagen diferencia NIR (Izq.), imagen diferencia SWIR (drcha.)	49
Figura 63 :Imagen detalle diferencia NIR (Izq.), imagen diferencia SWIR (drcha.).....	49
Figura 64: Imagen diferencia NDVI (Izq.), imagen diferencia NIR (drcha.)	50
Figura 65 : Imagen detalle diferencia NDVI (Izq.), imagen diferencia NIR (drcha.)	50
Figura 67 : Nivel de detalle de la imagen diferencia NDVI.....	51
Figura 68 :Imagen original de Junio, imagen diferencia de NDVI e imagen diferencia de NIR.....	51
Figura 69: Histograma y umbral de imagen diferencia NDVI.....	51
Figura 70 : Imagen NDVI con delimitación de cambios (izq.) & imagen NIR con la delimitación de cambios (dercha.)	52
Figura71 : Imagen de cambios RENDVI (Izq.)& imagen de cambios NDVI (drcha.)	52
Figura 72 : Imagen detalle de cambios RENDVI (Izq.)& NDVI (drcha.).....	52
Figura 73 : Imagen de cambios NDII (Izq.)& imagen de cambios NDVI (drcha.).....	53
Figura 74: Imagen detalle de cambios NDII (Izq.)& NDVI (drcha.).....	53
Figura 75 : Histograma y umbral de imagen diferencia NDII.	54
Figura 76 : Imagen NDII con delimitación de cambios (izq.) & imagen NDVI con la delimitación de cambios (dercha.)	54
Figura 77 : Histograma y umbral de imagen diferencia SAVI.....	54
Figura 78: Imagen de cambio SAVI.....	55
Figura 79 : Histograma de CP.	55
Figura 80: Histograma de las 6 primeras CP.	55
Figura 81:Imagen de CP de talas, a)CP1, b)CP2,c) CP3,d) CP4, e) CP5, f) CP6, g) imagen diferencia NDVI....	58

Figura 82 : Histograma y umbral de imagen ACP	59
Figura 83 : Imagen con polígonos tras aplicar el umbral en CP6 (izq.)& polígonos en NDVI.	59
Figura 85: Detalle de la detección de cambios en canteras.....	60
Figura 86: Superposición de los histogramas de diferencia entre bandas.	61
Figura 87 : Superposición de los histogramas de diferencia entre IV.....	61
Figura 88 : Correlación gráfica entre imágenes diferencia.	63
Figura 89: Polígonos de los bosques del Inventario Forestal de Guipúzcoa.....	64
Figura 90: Cambios NIR(arriba izq.),Cambios NIR con zonas de bosque (arriba drcha.), NIR tras aplicar filtro de bosque (abajo izq.), NIR superior a 0,5ha tras aplicar filtro bosque (abajo drcha).	66
Figura 91 : Talas de archivo& talas detectadas.....	67
Figura 92: Gráfico de los valores de la media de los IV para las zonas de tala.	68
Figura 93 : Valores medios del NDVI por especies.....	87
Figura 94 : Valores medios del RENDVI por especies.....	88
Figura 95 : Valores medios del NDII por especies.	89
Figura 96 : Valores medios del SAVI por especies.....	90
Figura 97 : Valores medios del NDVI por pendientes.	91
Figura 98: Valores medios del RENDVI por pendientes.	92
Figura 99: Valores medios del NDII por pendientes.	93
Figura 100: Valores medios del SAVI por pendientes.	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Superficie de corta de la base de datos por especie.	22
Tabla 2: Interpretación de los colores en los que se detectan los cambios (Chuvieco, 2002)	29
Tabla 3: Estadísticas básicas de los IV.	35
Tabla 4: Matriz de correlaciones entre IV.	37
Tabla 5 : Autovalores en el ACP.	56
Tabla 6: Autovectores en el ACP.	57
Tabla 7 : Correlaciones entre imágenes diferencia y CP6.	60
Tabla 8 : Resultados de imágenes diferencia.	60
Tabla 9: Estadísticas de las imágenes diferencia entre bandas.	62
Tabla 10 : Estadísticas de las imágenes diferencia IV.	62
Tabla 11: Matriz de correlaciones entre imágenes diferencia.....	63
Tabla 12: Superficie de cambio detectada.	64
Tabla 13 : Resultados de los errores y porcentajes calculados para cada método.	65
Tabla 14: : Estadísticas de los IV para las zonas de tala.	67
Tabla 15: Superficie de tala por especies.	69
Tabla 16: Porcentajes de acierto por especies	70
Tabla 17: Evolución de los IV por especies.	84
Tabla 18: Evolución de los IV por pendiente,.....	86

1. RESUMEN

El objetivo general de este estudio ha sido evaluar la posibilidad de detectar cortas forestales en una zona del interior de Guipúzcoa utilizando observaciones del sensor óptico multiespectral Sentinel-2, a partir de imágenes aniversario de diferentes fechas. Para ello se han utilizado diversas metodologías para la detección de cambios como son las composiciones visuales, la diferencia entre imágenes y los componentes principales. Como objetivo específico se ha realizado el análisis de las áreas detectadas como cortas, calculando para ello diferentes índices de vegetación como el NDVI, el RENDVI, el NDII y el SAVI. Se han comparado las diferencias entre las diferentes metodologías empleadas, analizando la temporalidad y la influencia de los índices de vegetación en la detección de cortas, viendo cómo cambian los valores de estos en las diferentes fechas en función de las especies y las pendientes en las zonas de tala.

1.1 PALABRAS CLAVE

Detección de cambios, Sentinel-2, cortas forestales, índices de vegetación.

1. ABSTRACT

The general objective of this study is to evaluate the possibility of detecting forest cuttings, in an interior area of Guipuzkoa. Using for that observations of the optical multiespectral sensor Sentinel-2, based on images from different dates. For that, it has been used diverse methodologies to detect changes, such as visual components, differences between images and main components. As specific objective, it has been realised the analysis of some areas detected as cuttings, calculating for that different vegetation indexes as NDVI, RENDVI, NDII and SAVI. In addition, it has been compared differences between the used methodologies, and it has been analyzed the influence and relation of the use of vegetation indexes in forest cutting detection in a different time. Regarding as well how the values change in different dates, according to the species and slope of the logging area.

1.1 KEYWORDS

Change detection, Sentinel-2, forest cuttings, vegetation indexes.

2. INTRODUCCIÓN

Este trabajo es el trabajo fin de master universitario del Máster Universitario en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección impartido por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Pública de Navarra durante el curso 2016-2017. El trabajo ha sido llevado a cabo en la empresa HAZI, situada en la localidad de Arcaute (Álava), dedicada a impulsar la competitividad y la sostenibilidad del sector primario y alimentario y el desarrollo sostenible del medio rural y litoral trabajando para el Gobierno Vasco.

El término de teledetección deriva del término anglosajón “remote sensing” o percepción remota, utilizado por primera vez en 1950 (Walter, 2006). La teledetección parte del principio de existencia de una perturbación producida por un objeto, área o fenómeno como pueden ser las ondas sísmicas, campos gravitacionales o energías electromagnética, dicha perturbación es registrada en el medio de observación, para ser interpretada más tarde. Se pueden encontrar definiciones como la de este autor (Sabins, 1978) que la define como “el registro de información de un objeto sin entrar en contacto material con él en las regiones de ultravioleta, visible, infrarrojo o microondas, por medio de instrumentos como escáneres y cámaras localizadas en plataformas móviles (un avión o satélite) y el análisis de la información adquirida por medio de técnicas de fotointerpretación, interpretación de imágenes y procesamiento de las mismas”. Por lo que, a la hora de definir la teledetección quedan claros los siguientes aspectos: La información se obtiene a distancia sin entrar en contacto directo con el objeto, se registra radiación electromagnética a través de sensores localizados en plataformas móviles y los datos obtenidos se transforman en información útil, por medio de técnicas de interpretación y reconocimiento de las superficies.

Con el tiempo este término ha ido cobrando mayor importancia debido a los avances tecnológicos hasta convertirse en una técnica de obtención de información indispensable en muchos campos. La teledetección como es aplicada hoy en día se podría decir que es una técnica relativamente reciente, pero que ha venido aplicándose mucho tiempo atrás. Los sensores utilizados hoy en día son muy variadas, aparte de utilizar sensores espaciales, también se utilizan sensores aéreo-tripulados, sensores terrestres y aviones no tripulados, captado estos sensores imágenes de todo como son el lidar, el radar y las imágenes multiespectrales.

Los inicios de la teledetección se sitúan a mediados del siglo XIX, aunque la producción de manera significativa de imágenes de la Tierra se remonta al siglo XX. Fue en 1957 cuando se lanza el primer satélite artificial soviético al espacio Sputnik considerado un hito histórico en la teledetección ya que esta misión y esta plataforma inauguraron una nueva época para la observación de la Tierra, que ha sido seguida de numerosas misiones civiles y militares. El desarrollo de la aviación, el inicio de la Era Espacial con el lanzamiento de los primeros satélites en la década de los setenta, y la fabricación de nuevas cámaras y sensores son hechos importantes en la captación de imágenes de la superficie terrestre (Friedmann J. y Weaver C., 1981).

Esta técnica aplicada depende mucho del desarrollo tecnológico existente en cada momento. Por ello, utiliza aspectos muy variados desde óptica y detectores de sensor, la plataforma que sustenta estos sensores, los sistemas de transmisión y los sistemas de tratamiento. En las últimas décadas han variado las formas de teledetección produciéndose un crecimiento vertiginoso tanto en la calidad como en la cantidad y variedad de la información disponible para todo tipo de campos científicos (Chuvieco E., 2008), obteniendo cada vez mejores imágenes con mayores resoluciones espaciales, espectrales y temporales.

Hay destacar también que la explotación de los datos que proporcionan los satélites no habría sido posible sin el desarrollo simultáneo de los sistemas de análisis de imagen. La incorporación de nuevas posibilidades de tratamiento y la mejora de los procesos que ya estaban vigentes, unido a la simplificación de los procedimientos, el uso de los programas informáticos y la cada vez mayor potencia y rapidez de las plataformas de proceso están permitiendo abordar problemas cada vez más complejos. Por otro lado, los datos espaciales procedentes de imágenes de satélite constituyen volúmenes de información muy considerables, particularmente cuando los estudios se desarrollan sobre regiones geográficas extensas. La herramienta capaz de gestionar eficazmente ese tipo de información son los sistemas de información geográfica (SIG) de carácter teselar o *ráster*. Ha sido a partir del desarrollo de los SIG cuando ha sido posible la gestión útil de la teledetección en muchos campos hasta entonces inexplorados.

Actualmente en la Tierra hay más de 3000 satélites artificiales en órbita, pero desde que fue lanzado en 1957 han sido lanzados al espacio más de 8000 satélites, uno de los últimos lanzamientos importantes ha sido el Sentinel-2.B lanzado por la Agencia Espacial Europea en marzo de 2017. Hoy en día el Sentinel-2 es uno de los satélites gratuitos disponible al alcance de todos más completos en cuanto a su resolución espacial, temporal y espectral se refiere.

Los satélites Sentinel-2 forman el núcleo de la red de vigilancia medioambiental Copernicus de la Unión Europea y proporcionan la continuidad de imágenes de los satélites Spot y Landsat. Ofreciendo información operacional de las superficies emergidas, los océanos y la atmósfera de nuestro Planeta para facilitar la adopción de políticas medioambientales y de seguridad, y para responder a las necesidades de ciudadanos al disponer de una alta resolución espectral y espacial. Este satélite es utilizado principalmente para el monitoreo de la tierra, la gestión de emergencias, la seguridad y el control del cambio climático, siendo una herramienta muy útil también para el control de la deforestación. (ESA, 2016a).

La deforestación arrasa los bosques y las selvas de la Tierra de forma masiva, según la ONU la superficie de bosques primarios ha disminuido en más de 40 millones de hectáreas desde el año 2000, reduciéndose cada año una superficie aproximada de 75000 km². Hoy en día los bosques cubren una superficie aproximada de tan solo el 30% de la superficie de la Tierra pudiendo llegar a desaparecer las selvas tropicales y los bosques pluviales dentro de cien años si continúa el ritmo actual de deforestación, ya que según las cifras de la Organización Mundial para la Agricultura y la Alimentación (FAO) a nivel mundial, cada año se pierden 13 millones de hectáreas de bosques.

La mayor parte de los cambios producidos en la cubierta vegetal y los bosques son debidos a los cambios en la cobertura y la degradación e intensificación en el uso del terreno (Lambin, 1997). La degradación forestal o la pérdida de vegetación engloba por tanto todos los impactos ecológicos a cualquier escala que se producen en el planeta, afectando en la pérdida y degradación del suelo, produciendo cambios en el microclima debido que a que la eliminación de la capa vegetal elimina los palios naturales de los bosques y selvas que impiden que incidan los rayos solares en el interior y mantienen el calor durante la noche, esto implica un cambio de temperatura más extremo que repercute en las plantas y en los animales; la pérdida en la diversidad de millones de especies ya que el 70% de están habitan en los bosques y no sobreviven a esta ; y produciendo un incremento de los gases de efecto invernadero ya que los árboles tienen relación directa con la absorción de estos dando como resultado el incremento del avance del cambio climático ; incremento que también se ve relacionado con el papel crucial que desempeñan los árboles perpetuando el ciclo hidrológico y devolviendo el vapor de agua a la atmósfera.

Para poder medir los cambios en la cobertura vegetal y en los usos del suelo, se realiza mediante documentos generados por percepción remota utilizando imágenes de satélite o fotografías aéreas o mediante cartografía temática de cobertura. En todas las regiones del Planeta se producen anualmente cortas de árboles pero los casos de deforestación más inminentes se producen en las zonas de selva tropicales con una tasa anual de deforestación de 0.8%.

El impacto que ocasiona en el terreno, depende de factores ambientales y económicos que varían en función de las regiones (Skole *et al.*, 1994; Kummer, 1994). Las causas de la deforestación son múltiples, desde los pequeños agricultores para el cultivo o siembra de pasto, las grandes empresas madereras, hasta las políticas de las instituciones económicas internacionales teniendo en cuenta la falta de control de los gobiernos y los intereses creados y el dinero que se mueve con la explotación de los bosques y selvas. Los bosques primarios con riqueza en especies de maderas comerciales suelen ser los más afectados, realizándose frecuentemente talas ilegales en la mayoría de zonas tropicales.

El oeste de África tiene el mayor porcentaje de deforestación con un 44%, seguido por con el sur y sudeste de Asia 34% y después por América Latina con un 32% (Houghton, 1994). La mayor causa de pérdida de diversidad biológica es causada por la transformación humana de los hábitat naturales (Lee *et al.*, 1995), causando los humanos el 69,5% de la degradación del terreno existente. (Lambin, 1997).

El crecimiento demográfico, la pobreza estructural, la gran concentración de la propiedad de la Tierra, el no haber el control y vigilancia requeridos en las áreas naturales y la debilidad de los sectores alternativos a la agricultura son algunas de las muchas causas que producen los altos índices de deforestación sobre todo en países en vía de desarrollo y el deterioro ambiental (Vargas, 2002). La ganadería es una de las causas importantes de la deforestación en América latina, en cambio en África la principal causa es la recolección de madera para la producción de biomasa forestal para combustible. La minería, la explotación y búsqueda de petróleo, la construcción de las infraestructuras debido al constante crecimiento urbano y rural. Aunque no toda la deforestación es causa de la intencionalidad, también la sequía, la desertificación y los incendios forestales son otros de los muchos factores de esta.

Aunque el ritmo de deforestación se ha frenado en los últimos años, en 100 años podrían llegar a desaparecer los bosques y selvas del planeta si se continúa así. Lo ideal sería frenar de forma masiva la tala de árboles pero las realidades financieras hacen de esta solución sea algo poco probable. Se deberían de gestionar los recursos vegetales balanceando la tala con la plantación de nuevas especies, aun así el número de nuevas plantaciones va aumentando cada año pero estos niveles de árboles jóvenes no sustituyen a los viejos. Es importante por tanto, saber gestionar los recursos disponibles hoy en día para analizar y frenar en la medida de lo posible el deterioro del paisaje vegetal y de la biodiversidad producidos por la deforestación y la tala de árboles (Vargas, 2002).

En España se puede decir que aunque existen pequeñas superficies de bosque intacto en zonas del Pirineo y la cordillera Cantábrica, son zonas muy pequeñas para ser consideradas bosques primarios. Aun así hay que conservarlos puesto que la mayoría de la biodiversidad forestal está amenazada en los bosques ibéricos. El estudio de este proyecto que se lleva a cabo en el País Vasco en la zona del interior de Guipúzcoa donde se producen anualmente pequeñas talas de árboles controladas bajo permiso como en el resto del País, con el fin de mejorar la repoblación de los montes y aumentar la producción final de estos para obtener los productos principales que fundamentalmente se obtienen en la gestión y utilización de los sistemas forestales como son la madera y los pastos.

Existen diferentes tipos de cortas, las cortas por repoblación son un procedimiento ordenado para renovar o establecer una masa natural o artificialmente durante el periodo de regeneración con el fin de crear o mantener condiciones favorables en las primeras fases de la vida de lo repoblado. También se realizan cortas intermedias durante la mayor parte del turno desde que se establece la masa hasta que llega el periodo de repoblación, estas se realizan a distintos intervalos con el fin de corregir defectos del monte y aumentar la cantidad y calidad de la producción final, el fin de estas a diferencia de las de las cortas de repoblación es que no son realizadas con el fin de repoblar. Estas no son necesarias hacerlas de golpe y se pueden clasificar en limpias, cortas de liberación, claras, cortas de mejora y cortas de recuperación y

saneamiento. También se pueden realizar otros tratamientos selvícolas como son las podas, las rozas de regeneración, la eliminación de matorral y la selección de brotes (Junta de Andalucía).

Aunque sea una escala muy inferior a los estudios que se hacen a nivel mundial en los grandes bosques y selvas tropicales, estas cortas también se pueden considerar también parte de la deforestación en una escala muy pequeña.

La teledetección y fotointerpretación son técnicas cada vez más empleadas para el análisis del medio natural y el entorno urbano, tanto por su capacidad de caracterización del territorio y todos los elementos que lo componen, como por su carácter multi-temporal que permite estudiar la evolución en diferentes etapas. Pero hay que tener en cuenta que se encuentra condicionado su empleo por las limitaciones espaciales, espectrales y radiométricas de las imágenes disponibles.

Gracias a los avances tecnológicos, se puede tener un conocimiento global de cualquier región de la Tierra a partir de las imágenes obtenidas mediante los sensores a bordo de las plataformas espaciales. Estas imágenes tomadas por los satélites cada vez están más accesibles a cualquier ciudadano o institución, cada vez son mayores las imágenes de satélites gratuitas a las que se puede acceder, a las que antes por falta de centros de formación adecuados o por carencias materiales de distinto tipo y dificultades de aplicación las instituciones con responsabilidad en la gestión del territorio lo tenían mucho más difícil de acceder (Chuvieco, 2002). Estas tecnologías proporcionan rapidez y precisión en los estudios ambientales, facilitando también el levantamiento, análisis, evaluación, gestión, y puesta en marcha de proyectos relacionadas con los elementos de la tierra y la gestión forestal que se tratará en este estudio para la detección de cortas forestales que serían un caso de deforestación en pequeña escala

Las imágenes captadas por sensores remotos desde satélites, han sido muy utilizadas para la cartografía y seguimiento de la deforestación coordinándose para su control, esfuerzos internacionales en programas permanentes (Nelson et al, 1987; Malingreau y Tucker, 1987; Miller, 1991). El cambio de cobertura forestal es el elemento fundamental en la mayoría de los trabajos existentes sobre la detección de cambios (De Barros Ferraz et al. 2005; Frohn & Hao 2006; Steve Neil, Gillanders, 2003; Millington, Velez-Liendo, & Bradley 2003). Estos estudios son la base para conocer las tendencias en los procesos de degradación, desertificación, cambios urbanos, pérdida de biodiversidad y deforestación (Lambin et al., 2001). Los sensores remotos son muy útiles para determinar los cambios en el área y los patrones espaciales del paisaje debidos a la deforestación (Andrade, Hurtado, & Torres, 1992).

Antes de aplicar cualquier metodología para la detección de cambios es importante la calibración radiométrica y geométrica de las imágenes, para poder comparar pixel a pixel las series multitemporales entre ellas (Gordon, 1980; Singh, 1989). Autores recomiendan la transformación previa de los valores digitales a niveles de reflectividad para eliminar así el efecto de la calibración de los sensores, la dispersión atmosférica y la altura solar en las imágenes obtenidas en las diferentes fechas (Robinove, 1982; Fung y Le Drew, 1987; Hill y Sturm, 1991).

Los sensores utilizados para la detección de cambios son muy variados debido al amplio abanico de sensores de los que se dispone, cuando no se disponía de sensores gran grandes resoluciones, al utilizar sensores de baja resolución como NOAA- AVHRR se obtenían peores resultados debido al gran tamaño de pixel en el que se sobrevalora la deforestación (Cross et al, 1991), obteniéndose mejores resultados después con series sensores con series temporales altas como Landsat (Green y Sussman, 1990; Yan and Roy, 2015), también se han utilizado imágenes SPOT (Vargas y Chuvieco, 1995) en algunos trabajos se combina el uso de satélites de baja y alta resolución para obtener una cobertura global del fenómeno con mayor detalle (Stone et al, 1991), otros estudios han utilizado imágenes MODIS (Arvor et al., 2011, Pringle et al., 2013), la combinación de satélites Landsat y SPOT (Matton et al., 2015) o Landsat y MODIS (Jia et al., 2014). Muchos autores han estudiado las posibilidades del Sentinel-2 en diferentes publicaciones científicas

(Drusch et al., 2012; Delegido et al., 2011; Wulder et al., 2016), este satélite abre nuevas posibilidades en el mundo de la teledetección, con imágenes de mucha calidad que mejoran mucho las misiones operativas existentes

Tras elegir el sensor a utilizar que en este caso se utilizará como se ha mencionado anteriormente el Sentinel-2 debido a su gran resolución espectral, temporal y espacial y al ser un satélite relativamente nuevo se quieren ver las posibilidades que este ofrece en la detección de cambios. El siguiente paso importante en la selección de la metodología a utilizar, el autor Chuvieco en su libro de teledetección ambiental, define diferentes metodologías para la interpretación del cambio de suelo mediante imágenes de satélite o sensores remotos desarrollados por diferentes autores., como las composiciones de color multitemporales (Chuvieco, 2002 y 2008); la diferencia de imágenes que señala las zonas que han perdido o ganado vigor vegetal cambiando su cobertura por causas antrópicas o naturales (Schowengerdt, 1983), que se pueden utilizar con mayor frecuencia sobre índices de vegetación (Coppin y Bauer, 1994 ; Martin y Chuvieco, 1995) , también se puede sustraer pixel a pixel dos imágenes que habían sido previamente clasificadas (Hall et al., 1984); la metodología de el cociente entre imágenes (Howarth y Wickware, 1981), utilizado en inventarios agrícolas y forestales (Howarth y Wickware, 1981), es frecuentemente utilizado al igual que la diferencia de imágenes mediante su aplicación en índices de vegetación simplificando así la variación vegetal en una sola banda (Grover et al., 1995; Martin y Chuvieco 1995); otro método sería el de los componentes principales que sintetizan las bandas originales en nuevas bandas recogiendo la información más relevante (Maselli et al., 1995; Green et al., 1988; Richards, 1984); metodologías menos utilizadas serían las de calcular la recta de regresión en los NP de las imágenes aislando los píxeles de cambio en función del tamaño de los residuales y por último la clasificación no supervisada de imágenes de imágenes, o de las bandas transformadas mediante el ACP o la transformación de tasseled cap (Schreier et al, 1982), mediante este método de clasificación han obtenido peores resultados que con los anteriores. En el caso de este estudio las metodologías que se analizarán serán las composiciones visuales con imágenes multitemporales, la diferencia entre imágenes y los componentes principales.

Se han revisado muchos trabajos utilizados en teledetección para el empleo de detección y seguimiento en los procesos de deforestación autores que proponen el análisis visual y digital (Batista Tucker, 1991; Green y Sussman, 1990). Las técnicas más utilizadas han sido el empleo del análisis lineal de mezclas espectrales, de cara a extraer información sub-píxel (Hlavka y Spanner, 1995), en las zonas con grandes coberturas nubosas la utilización de imágenes radar (Grover *et al.*, 1995), y el análisis multitemporal.

Los sensores ópticos tienen limitaciones debidas a las malas condiciones atmosféricas con la aparición de nubes para lo cual se han encontrado muchos trabajos en los que utilizan sensores radar (Rignot et al., 1993; Gamba et al., 2006; Servello, Kuplich, & Shimabukuro 2010). Se han obtenido resultados en estudios realizados por Keil et al. (1996) y Kuntz & Siegert (1996) donde se ven las limitaciones de mapear cambios y tipos de coberturas con exactitudes de menos del 50% en la clasificación. Es por esto que muchos estudios revelan la importancia de utilizar métodos radar y ópticos conjuntamente para mejorar los resultados obtenidos. Con base en esto sugieren la fusión de imágenes ópticas y de radar (Chu, Ge, & Wang 2010).

Con base a todo lo descrito anteriormente se plantea realizar esta investigación cuyo objetivo es la detección de pequeñas talas forestales mediante imágenes de alta resolución espectral y espacial Sentinel-2, utilizando diversas para analizar con cual se obtendrán los mejores resultados.

2.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este estudio es evaluar la posibilidad de detectar cortas forestales utilizando observaciones del sensor óptico multispectral Sentinel-2-2. Utilizando diversas metodologías se quiere

realizar un estudio para ver la potencialidad de este sensor y ver la capacidad de detectar cortas forestales en una zona del interior de Guipúzcoa.

Se determinará previamente el área de trabajo teniendo en cuenta la información disponible sobre cortas forestales en el área para los años 2016 y 2017 en el territorio de Guipúzcoa, para poder contrastar los datos obtenidos y verificar los resultados.

Se evaluarán diversas metodologías para la detección de cambios utilizando imágenes aniversario de dos fechas diferentes. Las metodologías que se analizarán serán las composiciones visuales con imágenes multitemporales, la diferencia entre imágenes y los componentes principales. En el caso de las composiciones visuales y la diferencia de imágenes se analizarán diferentes bandas y diferentes índices de vegetación como el NDVI "*Normalized Difference Vegetation Index*" (Rouse et al, 1974), REDNDVI "*Rededge Normalized difference Vegetation Index*" (Gitelson and Marzlyak, 1994), NDII "*Normalized Difference Infrared Index*" (Hunt y Rock, 1989) y SAVI "*Soil Adjusted Vegetation Index*" (Huete, 1988), para realizar un análisis más completo de los resultados que se pueden obtener con estas metodologías y comparar las diferencias obtenidas.

Tras analizar todas las imágenes obtenidas y la comparación entre los resultados obtenidos mediante los diferentes métodos, se elegirá el método que mejores resultados de para determinar así la mejor detección de talas forestales para la zona de Guipúzcoa.

Se procederá después como objetivo específico a realizar el análisis de las áreas en las que se han detectados cortas para las diferentes fechas teniendo en cuenta las diferencias entre los índices de vegetación calculados, en función de las especies forestales y de la influencia del relieve y de la pendiente en ellos.

De esta manera se comprobará el potencial de los sensores Sentinel-2 en la detección de cortas forestales, si existen diferencias entre las diferentes metodologías empleadas y si las especies y las pendientes influyen en los valores de los índices de vegetación, viendo también si estos cambian en función de la época y si hay diferencias entre los valores obtenidos utilizando unos índices o otros.

3. MATERIALES Y ZONA DE ESTUDIO.

3.1 ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio en la que se va a realizar el análisis para la detección de cortas, es una zona del interior de Guipúzcoa entre los valles del Oria y el Deba. Prácticamente abarca casi toda la extensión de Guipúzcoa salvo las zonas de costa y las zonas más del noreste de esta provincia.

Guipúzcoa es una zona con mucho relieve con alturas entre los 500 metros y los 1544 metros presentando grandes zonas de montes con elevadas pendientes. Los ríos tienen dirección perpendicular a la costa y no tienen caudales ni recorridos muy abundantes pero al tener grandes pendientes desarrollan grandes erosiones a su alrededor.

El clima es de tipo atlántico o también denominado templado húmedo sin estación seca. Las precipitaciones oscilan entre los 1.200 mm y los 2000 mm anuales por lo que son abundantes lo que influye en el estado de la vegetación. Las temperaturas son moderadas, teniendo temperaturas medias mensuales entre 8 y 10 grados en invierno y entre 18 y 20 grados en verano, por lo que los inviernos no

son muy fríos pero los veranos tampoco son muy calurosos aunque se dan episodios cortos de fuerte calor pudiendo llegar a los 40 grados.

En cuanto a la vegetación se puede decir que las formaciones vegetales arbóreas de bosques son abundantes, encontrándose muchas especies de árboles como el Roble, la Haya, las Coníferas, los Abetos y los Alerces, entre otras muchas. También se encuentran aquí grandes formaciones arbustivas y herbáceas con grandes praderas muy verdes y matorral de tipo landa como son los Brezos, las Argomas y los Helechos.

Esta provincia se puede dividir en tres sectores: litoral, medio y alto. La parte litoral en la que se encuentra la costa con grandes acantilados quedará fuera de la zona de estudio. En el sector medio se encuentran la mayor parte de los valles de los ríos Deba, Urola y Oria. Y en el sector alto destacan los conjuntos montañosos de Aralar y Aitzgorri.

En cuanto a la extensión de la zona de estudio se podría decir mas detalladamente que, en la zona noreste de la provincia el análisis empezaría por encima de los municipios de Elgoibar y Elbar llegando hasta el noreste a las zonas de Lasarte y Hernani, sin llegar a la zona más norte de Guipúzcoa perteneciente a la costa y la zona mas al noreste de la provincia mas allá de Hernani como es la zona del municipio de Donosti. Por la parte Sur, se puede decir que el análisis se extiende hasta la zona de los montes del Txindoki, abarcando toda la parte del este de la provincia y toda la zona de la frontera con Navarra salvo la zona norte, en la parte del suroeste el análisis llega hasta los municipios de Oñati y Zegama.

Por lo que se cubre una extensión importante de Guipúzcoa, como se puede observar en la siguiente figura 1 en la que se ven las provincias de Euskadi y superpuesto un recuadro de rojo delimitando la zona de estudio sobre Guipúzcoa, descrita anteriormente.

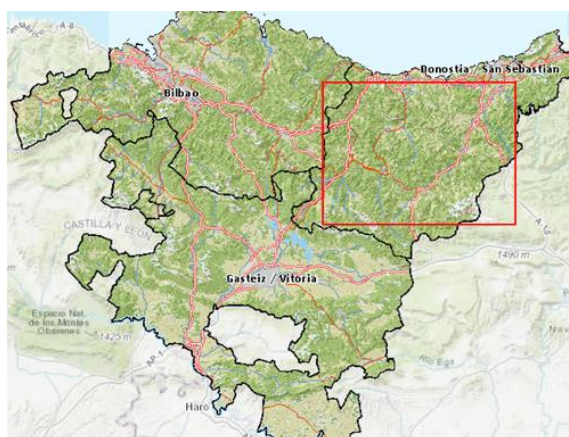


Figura 1 : Delimitación de la zona de estudio en Guipúzcoa.

Las coordenadas de la zona de estudio correspondientes a la esquina inferior izquierda son 42°57'47" N, 2°30'32" S y las coordenadas de la esquina superior derecha son 43°17'08" N, 1°54'49" S. En total la superficie de estudio abarca una extensión de $1,7433808 \times 10^8$ ha.

En la siguiente figura 2, se puede observar la zona ampliada con los nombres de los terminos de los municipios, y mayor detalle de las carreteras, ríos y relieve de la zona de estudio.

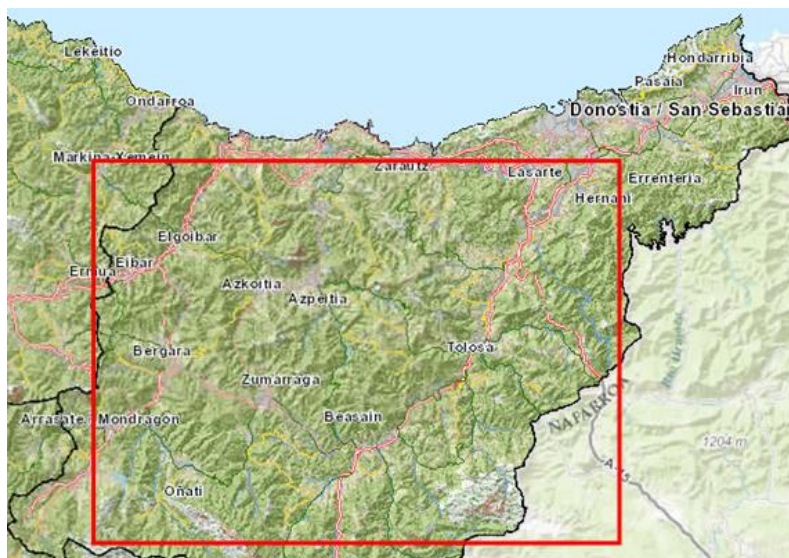


Figura 2 : Delimitación más detallada de la zona de estudio en Guipúzcoa.

Para estudiar las diferentes cortas que se han realizado en la zona de Guipúzcoa es importante realizar un análisis previo del terreno en el que se encuentran éstas. Para ello se realizará a partir de un MDT a 10 metros (obtenido mediante LiDAR en 2016) un mapa de pendientes y de orientaciones. En el MDT de la zona de estudio (Fig. 3) se aprecian unos valores de altitudes máximas en las zonas de mayor relieve de ~1500 metros correspondientes a las sierras de Aizkorri, Aralar y Ernio. Como se observa la zona de estudio es una zona muy montañosa con bastante relieve.

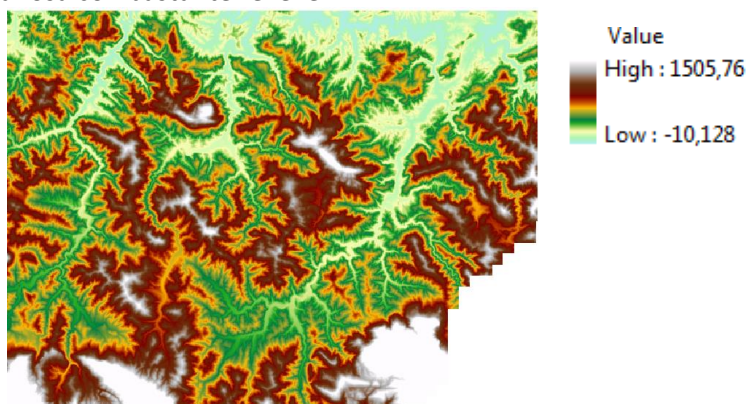


Figura 3: MDT del terreno.

En el mapa de orientaciones se observa la variabilidad de direcciones de los valles y cordales montañosos (

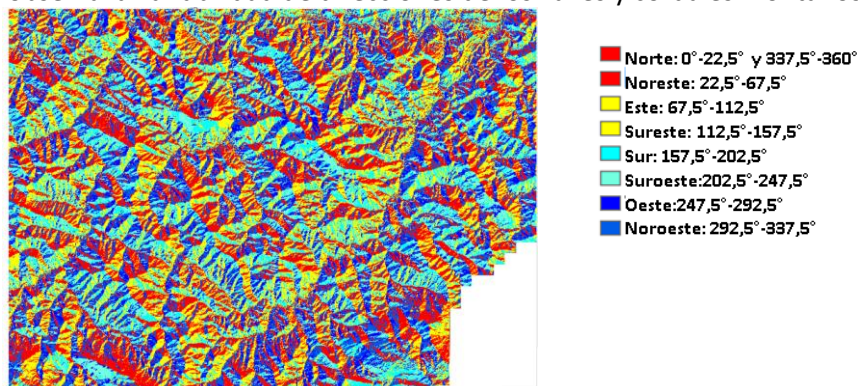


Figura 4: Mapa de orientaciones del terreno.

Como se puede observar en el mapa de pendientes de la zona (Fig. 5), la mayoría del terreno corresponde a un terreno con deslizamiento ligero con pendientes entre los 12° y los 30°, siendo las zonas de planicie y caída libre minoritarias y encontrándose también zonas con deslizamiento fuerte en lo alto de las montañas.

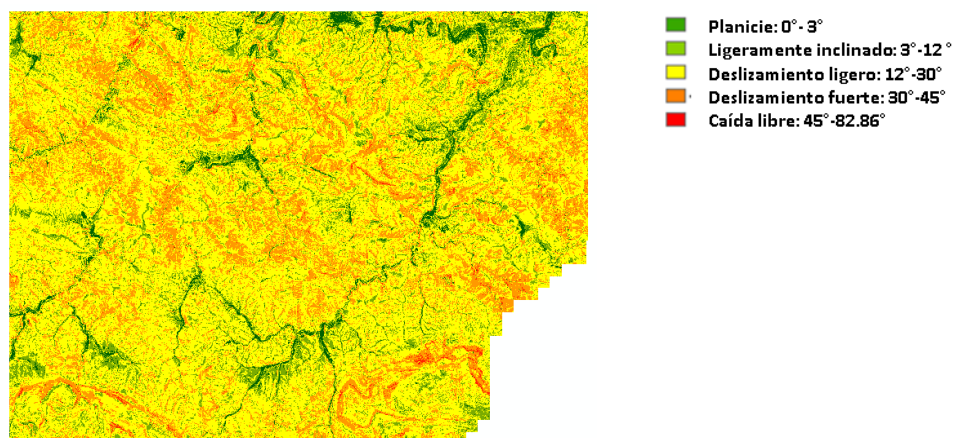


Figura 5: Mapa de pendientes reclasificado.

En cuanto a los tipos de vegetación presentes en la zona de estudio se puede decir que es una zona con una inminente presencia forestal teniendo el 72,3% de superficie forestal respecto al total geográfico de todo el País Vasco. Por usos, la superficie forestal, incluyendo la arbolada y la desarbolada (pastizal, matorral, roquedos) alcanza 490.027 ha, un 68% de la superficie total de la Comunidad Autónoma.

Se observa en la zona de Guipúzcoa la abundancia de diversas especies como: Alamos, Abedules, Abetos, Acacias, Alcornosques, Alerces, Alisos, Arces, Avellanos, Bardagueras, Bosques mixtos Atlánticos, Carpes, Castaños, Cedros, Cerezos, Chameciparis, Crataegus, Criptomeras, Encinas, Eucaliptos, Falsas Acacias, Fresnos, Hayas, Liquidambares, Madroños, Manzanos, Nogales, Pinos (Pinaster, Radiata, Silvestre, Laricio, Atenuata...), Piceas, Pinabetes, Prunus, Quecijos, Rebolllos, Robles (Americano, Pedunculano...), Sauces, Secuoyas, Serbales, Serotinas, Tuliperos y Tuyas.

En total la superficie de frondosas en Guipúzcoa es de 58.232 ha siendo superior la de coníferas con 65558ha. En cuanto a las especies de mayor abundancia en Guipúzcoa puede decirse que el 80% de las 7900ha de Alerce que hay todo Euskadi se encuentran en Guipúzcoa, el 68,4% de 7360ha de Abeto Douglas, el 51% de 13885ha de Pino Laricio, y el 32% de 54619 ha de Haya, encontrándose en esta zona también importantes superficies del Bosque Mixto Atlántico muy predominantes en todo Euskadi.

3.2 MATERIALES

3.2.1 SENTINEL-2 2

El satélite Sentinel-2 lanzado por la Agencia Espacial Europea (ESA), se basa en una constelación de dos satélites, el primero de ellos el Sentinel-2- 2A fue lanzado el 23 de junio de 2015 y el segundo el 2B ha sido lanzado hace poco el 7 de marzo de este año.

Ambos satélites se encuentran sobre la misma órbita, separados por 180 grados, para obtener una cobertura y una descarga de datos óptimos, cubriendo cada cinco días toda la cobertura terrestre abarcando en cada toma 290 km de anchura. Cada satélite lleva un nuevo sensor “Multi-spectral Image” (MSI) de alta resolución que contiene 13 bandas que trabajan en diferentes regiones del espectro electromagnético, de las cuales cuatro entre ellas el azul, verde, rojo e infrarrojo cercano tienen 10 m de resolución espacial, seis tienen 20 m de resolución incluyendo bandas en el red-edge que mejora la

configuración del sensor para estudios de aguas y vegetación (Delegido et al., 2011) y también en el SWIR y las otras tres tienen 60 m para la corrección atmosférica y detección de nubes.

Se puede observar más detalladamente en la siguiente imagen en la que se ven todas sus bandas, su resolución espacial, la anchura de cada una y el rango del espectro electromagnético en el que trabajan (Fig. 6).

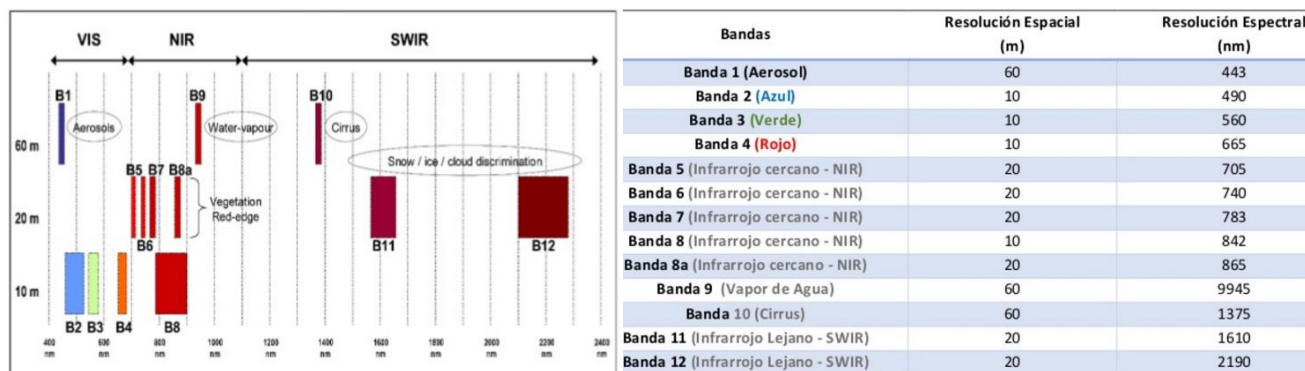


Figura 6: Bandas de Sentinel-2.

Esto da la posibilidad de realizar análisis multispectrales de todo tipo a través de la combinación de sus diferentes bandas. Realizando así el cálculo de diferentes índices espectrales derivados de la combinación de valores de reflectancia de un píxel a distintas longitudes de onda para indicar así la abundancia relativa de un parámetro de interés como puede ser la vegetación, la geología, áreas quemadas, áreas de agua, urbanas...

-Imágenes:

Para llevar a cabo el estudio de las cortas forestales realizadas durante el año 2017 en la zona de Guipúzcoa, se ha procedido a la descargar cuatro imágenes del satélite Sentinel-2 de diferentes fechas para detectar los cambios producidos en el entorno forestal. La descarga de estas imágenes se ha realizado desde la página de la ESA.

Se estudiarán las cortas detectadas en el año 2017 con imágenes aniversario de abril y de junio para ambos años. Para poder analizar bien el territorio es muy importante que estas imágenes estén libres de nubes para que no afecten en el comportamiento espectral de las cubiertas.

Todas las imágenes que pasan por esta zona han sido captadas en pasada descendente a las 11 de la mañana. Como se han utilizado imágenes de 2016 y 2017 el nivel de procesamiento de estas es diferente. Las imágenes anteriores al 1 de octubre de 2016, al ser más antiguas están en nivel de procesamiento 1C, por lo que habrá que aplicarle correcciones para conseguir la imagen en el nivel de procesamiento 2A. Las imágenes posteriores ya se ofrecen en nivel de procesamiento 2A.

Las imágenes en nivel 1C se obtienen utilizando un modelo digital de elevaciones para proyectar la imagen en la proyección cartográfica UTM/WGS84. Los valores de los píxeles se dan en unidades de reflectividad en el techo de la atmósfera. Los productos nivel 1C incluyen también máscaras de nubes, agua/tierra y datos ECMWF (total column of ozone, total column of water vapour and mean sea level pressure). Estos productos están corregidos radiométricamente y geoméricamente, incluyendo la octorectificación y el registro espacial (ESA, 2016b).

El nivel 2A será el nivel de procesamiento superior al 1C, en el que los valores de reflectancia están en la parte inferior de la atmósfera en una geometría cartográfica, corrigiendo así las imperfecciones que le

pueda dar la atmósfera a las bandas. Incluyen también las máscaras y datos antes mencionados de las imágenes 1C, aparte de una clasificación de la imagen y los mapas de probabilidad de presencia de nubes y de nieve. Serán imágenes corregidas ya atmosféricamente y topográficamente.

También el formato de descarga de las imágenes será diferente en 2016 y en 2017. Las imágenes anteriores al 1 de octubre de 2016 están compuestas por un conjunto de 15 tiles de 100 km² los cuales tienen aproximadamente unos 500MB de tamaño por lo que el archivo completo a descargar puede pesar varios gigas, de los que solo interesará quedarse con la imagen correspondiente al tile correspondiente con el WN en la que se enmarca la zona. En cambio para las imágenes posteriores a esa fecha ya directamente se puede realizar la descarga del granule WN sin necesidad de descargar todo el Tile o conjunto.

Al descargar cada imagen, se observa como está compuesta de diferentes carpetas, dentro de cada una está el archivo de metadatos con extensión .xml y la carpeta “granule” en la que se encuentran todos los tiles descargados. Dentro de cada tile habrá tres carpetas: IMG_DATA, AUX_DATA Y QI_DATA.

Tras hacer un estudio de las imágenes disponibles, las imágenes descargadas para el estudio han sido las siguientes:

- Imagen adquirida el 4 de mayo de 2016:
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160504T225057_R094_V20160504T105917_20160504T105917

La cobertura nubosa de esta imagen es del 5,78% pero no afecta a la zona de estudio como se puede observar en la pre visualización previa de la imagen antes de la descarga. Aunque se descarge todo el paquete de la imagen solo se procederá a trabajar con el este granule:

S2A_OPER_MSI_L1C_TL_SGS_20160504T163055_A004524_T30TWN_N02.02. Se puede observar la imagen descargada en la siguiente figura 7.

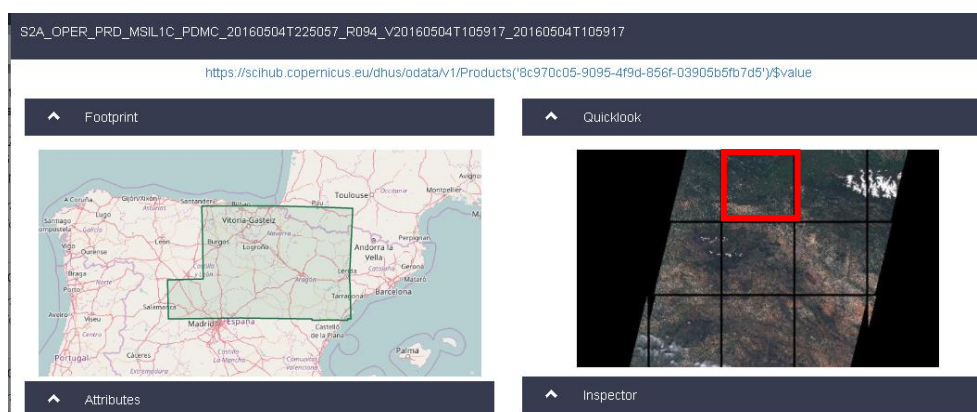


Figura 7: Imagen Sentinel-2 4 de mayo.

- Imagen adquirida el 23 de Junio de 2016:
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160623T182050_R094_V20160623T105858_20160623T105858

La cobertura nubosa de esta imagen es del 0.30% por lo que la zona de estudio está libre de nubes (Fig. 8). Se procederá a trabajar con el granule:

S2A_OPER_MSI_L1C_TL_SGS_20160504T163055_A004524_T30TWN_N02.02.

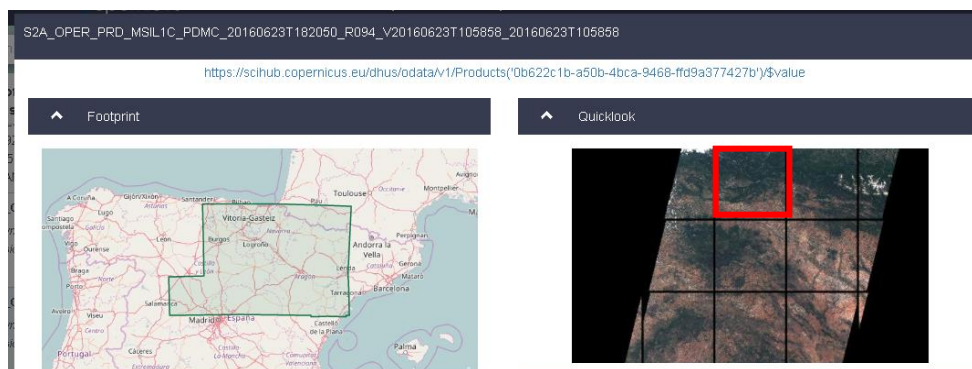


Figura 8: Imagen Sentinel-2 23 de junio.

- Imagen adquirida el 19 de abril de 2017:

S2A_MSIL2A_20170419T105621_N0204_R094_T30TWN_20170419T110601.SAFE

La cobertura nubosa de esta imagen es del 0.37%. Se descargará directamente ya el granule WN sin necesidad de descargar todo el Tile.

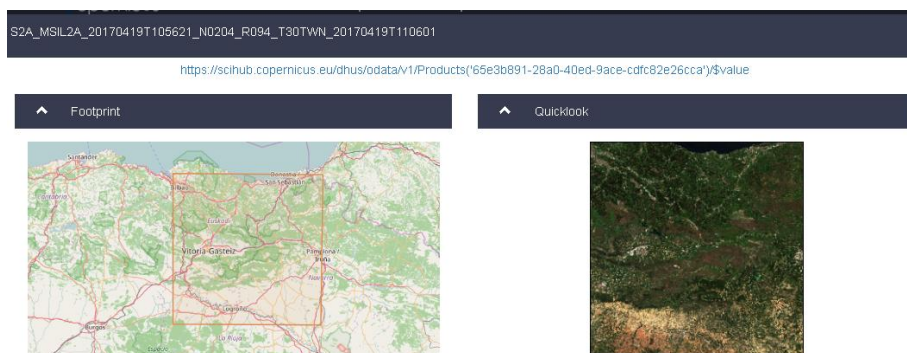


Figura 9: Imagen Sentinel-2 19 de abril.

- Imagen adquirida el 18 de Junio de 2017:

S2A_MSIL2A_20170618T105621_N0205_R094_T30TWN_20170618T110415.SAFE

La cobertura nubosa de esta imagen es del 0.40%, se descargará únicamente el granule WN.

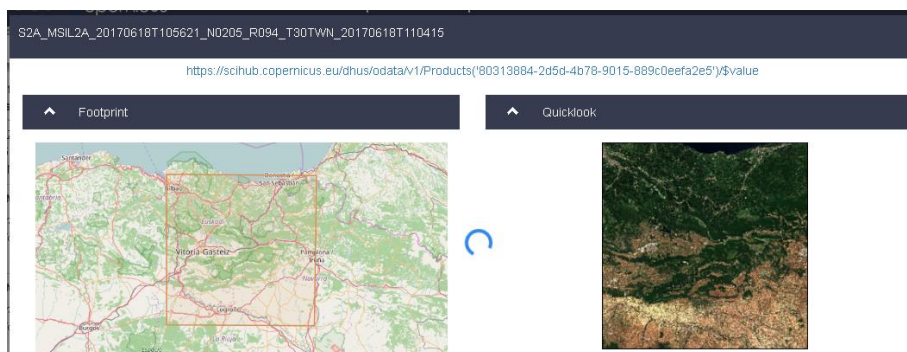


Figura 10: Imagen Sentinel-2 18 de junio.

3.2.2 ARCHIVOS CORTAS FORESTALES

Se dispone de un archivo con los permisos de corta autorizados para los años 2016 y 2017. No obstante no se puede saber con exactitud la fecha en la que se llevaron a cabo las cortas, por lo que varias de las del 2017 aún no se han ejecutado a la fecha en que se ha realizado el estudio. En la base de datos aparecen los

motivos por los que se ha pedido el permiso de corta siendo estos: la silvicultura, cortas sin aprovechamiento, enfermedad y por destrozos de los árboles causados por el viento. También se indican la especie y superficie de cada corta (Tabla 1).

Tabla 1: Superficie de corta de la base de datos por especie.

ESPECIE	Superficie ha
Pino Insignis	4191,66
Abeto	234,6
Pino Laricio	180,70
Alerce	122,35
Roble	49,93
Pino Pináster	28,73
Ciprés	24,28
Acacia	20,46
Aliso	13,26
Haya	11,76
Abedul	11,19
Plátano	9,23
Otras Frondosas	8,23
Castaño	7
Eucalipto	7
Otras Coníferas	4,56
Fresno	5,98
Cerezo	3,23
Encima	3,14
Chopo	2,78
Olmo	2,02
Secuoya	1,93
Pino Silvestre	0,85
Arce	0,27
Rebollo	0,12

En total la superficie de corta de todas las especies es de 4945,26 ha. Aunque el número de especies sea elevado la superficie de corta es muy pequeña para la mayoría de ellas, salvo las especies mayoritarias, que el Pino Insignis seguido después del Abeto y los Alerces pero ya con mucha menor extensión. Debido a la resolución espacial de las imágenes con las que se va a trabajar (bandas a 10 metros y a 20 metros) se han desechado cortas con una superficie por debajo de un umbral que se determina a partir de la resolución más desfavorable (20 metros). Por lo tanto, se desechará la detección de recintos con una superficie menor a 0,5 hectáreas, puesto que se estima que para poder analizar con un mínimo de rigor los cambios en la vegetación a partir de índices de vegetación se necesitaran al menos 12 píxeles por cada corta. En consecuencia, de las 3762 cortas incluidas en la base de datos, se selecciona un total de 2380 cortas (con una superficie de 4882,79 ha). Las especies como el Arce, el Cerezo, el Chopo. El Olmo y el Rebollo desaparecerán de la base de datos al tener superficies de corta muy pequeñas. En la Fig. 11 se muestran las parcelas de la base de datos completa y las seleccionadas que cumplen el criterio de tener una superficie mayor a 0,5ha.

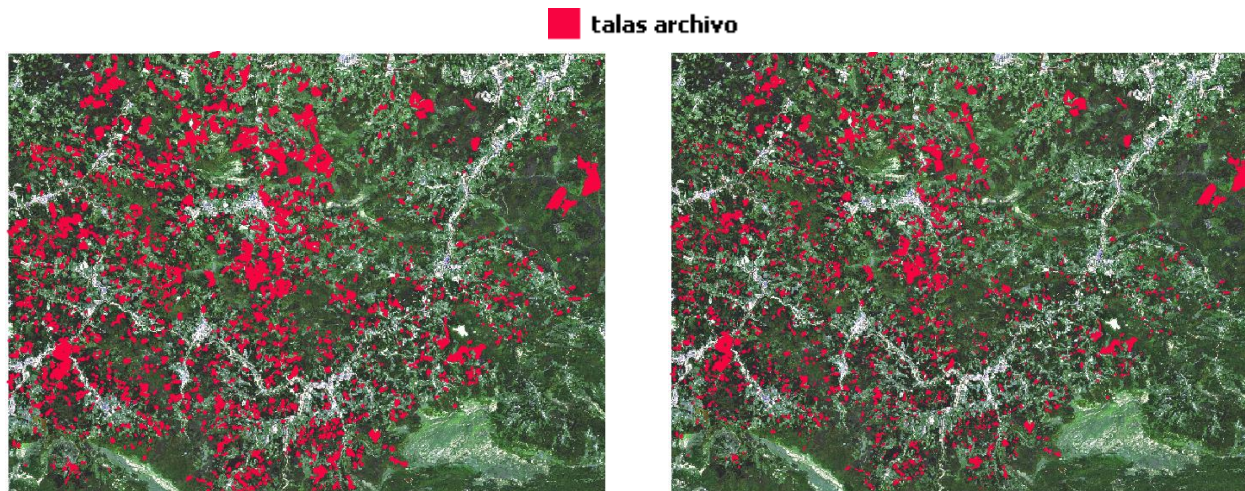


Figura 11 : Imagen de la zona con las cortas del archivo (izq.) & cortas del archivo mayores de 0,5 ha. (drcha.)

El estudio de las áreas detectadas mediante la metodología que mejores resultados de, se hará estratificando las superficies de cambio en diferentes pendientes (en función de las pendientes que se detecten en las zonas de tala) y en función de las especies de corta para ver cómo varían los índices de vegetación calculados en función de estos dos factores. Para realizar este estudio se cruzarán los datos de las cortas obtenidas con los datos del inventario forestal para determinar que especie se ha talado en la corta detectada, y con el mapa de pendientes para determinar la pendiente de cada una de las cortas detectadas. Al ser una zona muy montañosa las orientaciones de las laderas de las montañas son muy variadas y se dan muchos casos en las que una misma zona de tala tiene diversas orientaciones por lo que se ha desestimado hacer el estudio en función de la orientación de la parcela.

4. METODOLOGÍA

4.1 PRE-PROCESO

El nivel de procesamiento mínimo en el que se consiguen las imágenes Sentinel-2 descargadas desde la página de la ESA es el nivel 1-C, por lo que serán imágenes corregidas radiométricamente y geométricamente, incluyendo la ortorectificación y el registro espacial. Por lo que no será necesario corregir las imágenes ni geométrica ni radiométricamente porque ya se partirá de ahí.

Pero, antes de comenzar a trabajar con las imágenes Sentinel-2 es necesario hacer un pre proceso previo de estas metiéndoles los metadatos a las imágenes, remuestrearlas, pasar las que estén en niveles de reflectancia en el techo de la atmósfera a niveles de reflectancia en superficie y recortarlas a la zona de estudio.

4.1.1 SEN2COR

El SEN2COR (Sentinel-2 2 Corrections) es un plugin proporcionado por la ESA, que está basado en un conjunto de técnicas para la corrección atmosférica y un módulo de clasificación de escena, que corrige las imágenes adquiridas por el sensor de Sentinel-2 por bandas y las procesa en la resolución que se escoja.

Es un plugin externo y se ejecuta mediante un script de Python desde el programa gratuito que ofrece la ESA de SNAP o desde la línea de comandos. El SNAP es un software libre utilizado para el tratamiento, procesamiento y visualización de las imágenes Sentinel-2 y SMOS.

Las imágenes del 2016 correspondientes a la fecha del 4 de mayo y del 23 junio, utilizadas para llevar a cabo este estudio de Sentinel-2 obtenidas en nivel 1C requieren la corrección por tanto a nivel 2A como ha sido explicado anteriormente. Este paso se puede hacer a resolución 10m, 20m o 60m, pero hay que tener en cuenta que el programa solo transforma las bandas que están a esa resolución por lo que es conveniente primero realizar el remuestreo que se explicará en el siguiente apartado de todas las bandas a 10 metros y luego ya hacer la transformación para obtener todas las bandas en nivel 2A.

Las imágenes en nivel 1C se obtienen utilizando un modelo digital de elevaciones para proyectar la imagen en la proyección cartográfica UTM/WGS84. Los valores de los píxeles se dan en unidades de reflectividad en el techo de la atmósfera (Top of Atmosphere (TOA) reflectance), junto con los parámetros para transformar éstas en radiancias (ESA, 2016b).

Utilizando el toolbox de SNAP sen2cor de SNAP se pueden convertir a nivel 2A (Bottom of Atmosphere (BOA) reflectance), mediante la corrección atmosférica y topográfica en zonas montañosa derivada del modelo ATCOR (Sentinel-2 MSI – Level 2A Products Algorithm Theoretical Basis Document) (ESA, 2016b).

Aparte de convertir las imágenes a nivel 2A se genera junto a las imágenes un mapa clasificado y dos indicadores de calidad que serán el mapa de probabilidad de presencia de nubes y el mapa de probabilidad de nieve, aunque todos estos productos obtenidos no serán de interés en el caso de este estudio, únicamente se utilizarán las bandas obtenidas en nivel 2A. Puesto que no se trabajará con las imágenes desde el software libre de la ESA sino desde el software especializado para el tratamiento y procesamiento de imágenes geoespaciales ENVI.

Tras tener las imágenes corregidas en valores de reflectancia se procederá a remuestrear las bandas.

4.1.2 REMUESTREO

Puesto que se quiere trabajar con todas las bandas en conjunto y hacer combinaciones entre ellas es necesario tener estas con el mismo tamaño de pixel, como se ha visto antes el tamaño de las bandas no es el mismo siendo de 10, 20 y hasta 60 metros. También como se ha mencionado antes, a la hora de corregir las imágenes atmosférica y topográficamente como el SEN2COR actúa en función de la resolución elegida es mejor tener todas las bandas ya en la misma resolución para ejecutar el proceso de una sola vez por cada imagen.

Dado que la máxima resolución de pixel es la de 10 metros, para no perder resolución en las bandas que ya estaban a este tamaño, se remuestrearán todas las bandas a un tamaño de pixel de 10 metros dejando todas las imágenes con un tamaño de filas y columnas de 10980x10980 píxeles.

En el caso de las imágenes transformadas mediante SEN2COR, se eliminan las bandas de 60 metros (banda 1 y 9) ya que son bandas de aerosoles y de vapor de agua de la atmósfera utilizadas en la corrección a valores de reflectancia, y tras utilizarlas para eso se eliminan automáticamente. Por lo que de las imágenes descargadas ya en niveles 2A se eliminarán también ya que no tendrán efecto en la detección de las cortas y así todas las composiciones de imágenes tendrán las mismas bandas.

Una vez re muestreadas las bandas, para poder trabajar desde un único fichero se unirán todas las bandas en una sola imagen. Es muy importante el orden en el que se metan las bandas ya que se ordenan por

orden de entrada no por nombre, siendo el orden de las bandas introducido para la creación de una única imagen el siguiente: 2,3,4,5,6,7,8,8A,,11,12.

4.1.3 METADATOS

Una vez remuestreadas las imágenes, corregidas y unidas todas las bandas en un fichero, se obtienen en total 4 imágenes de las diferentes fechas de estudio con las que trabajar. Se deberán de meter los datos de las longitudes de onda y de la anchura de cada banda de la imagen a mano, ya que no se puede abrir la imagen directamente desde la cabecera donde se leen directamente todos los metadatos. ENVI tiene un apartado específico a la hora de abrir las imágenes para leer los datos desde la cabecera, pero con las imágenes de Sentinel-2 falla el programa y no las reconoce.

Estos datos se sacarán de la carpeta que se descarga junto a las imágenes en la que se obtienen todos los metadatos en formato XML. Los datos introducidos para cada banda han sido los siguientes:

<i>Bandas: longitud de onda media nm FWHD nm</i>		
1	443	20
2	490	65
3	560	35
4	665	30
5	705	15
6	740	15
7	783	20
8	842	115
9(8A)	865	20
10 (9)	945	20
11	1610	90
12	2190	180

También se meterán los valores de la irradiancia solar, el gain de la reflectancia y se determinará el sistema de referencia WGS84 con la proyección de UTM 30 para todas las imágenes.

4.1.4 RECORTAR

Tras tener las imágenes corregidas en niveles de reflectancia, remuestreadas todas sus bandas a 10 metros y con todos los metadatos ya estarán listas para trabajar con ellas.

El tamaño de las imágenes Sentinel-2 descargadas desde la página de la ESA es muy grande por lo que se recortarán las imágenes originales a la extensión de Gipuzcoa teniendo en cuenta la extensión de los datos de las cortas para restringir la zona, cuyas coordenadas se han detallado antes en la zona de estudio.

Las imágenes tendrán una extensión de 4808x3626 píxeles así a la hora de trabajar con ellas los procesos serán mucho más ligeros y rápidos, en la siguiente imagen se puede observar una de las imágenes sobre el contorno de Euskadi para hacerse a la idea de la extensión de las imágenes con las que se va a trabajar en proporción con el tamaño de todo el País Vasco (Fig.12) .



Figura 12 : Imagen recortada sobre el contorno del País Vasco.

4.2 ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Los índices de vegetación (IV) han sido unas herramientas muy utilizadas en la detección de cambios para el estudio de la deforestación (Coppin y Bauer, 1994; Martin y Chuvieco, 1995). Los IV son índices derivados de la combinación de los valores de reflectancia de un pixel en diferentes bandas espectrales (correspondientes a distintas longitudes de onda). Proporcionan un indicador de la abundancia relativa de un parámetro de interés relacionado con la vegetación, minimizando la influencia de la cubierta de suelo y de las condiciones atmosféricas. Por lo tanto, para su cálculo se requieren imágenes multiespectrales ya corregidas y en unidades de reflectancia.

Es previsible que una pérdida de masa forestal se refleje en variaciones bruscas en los índices de vegetación (Vargas, 2002). Por ello se procederá al cálculo de diferentes IV, que luego se utilizarán en el análisis de cambios mediante técnicas de diferencia entre las imágenes disponibles de abril y junio de 2016 y 2017. De esta manera se podrá ver la diferencia de valores entre áreas con cortas y sin cortas viendo cómo cambian los índices en estas zonas en función del periodo de tiempo y del estado de la masa forestal. Después, se analizarán los valores de estos índices para las diferentes especies forestales detectadas y en función también de la pendiente de la zona de estudio.

Los índices de vegetación calculados en este trabajo han sido los siguientes: NDVI, RENDVI, NDII y SAVI. Estos índices han sido elegidos ya que han dado buenos resultados en diferentes estudios relacionados con la detección de deforestación y se relacionan con cambios en grandes masas forestales (Sharma et al, 2015; Coppin y Bauer, 1994).

-NDVI

Normalized Difference Vegetation Index (Rouse et al, 1974). Este índice de vegetación es uno de los más antiguos y más utilizados en teledetección (Mefford, 2014), y facilita la interpretación directa de los parámetros biofísicos de la vegetación. La curva de reflectividad de la vegetación produce un salto entre el visible y el infrarrojo cercano, debido a que en el visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía recibida, y en el NIR en cambio el agua de las hojas refleja la mayor cantidad de energía. Debido al contraste de reflectividad producido en estas regiones del espectro electromagnético, el cálculo de este índice utiliza únicamente las bandas del rojo y del infrarrojo cercano. Esta será por tanto la fórmula a utilizar para su cálculo:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}$$

En el caso de Sentinel-2, las bandas a utilizar para el cálculo del NDVI correspondientes al NIR y al rojo serán la banda 8 y la banda 4 respectivamente. Al ser un índice normalizado, sus valores oscilan entre -1 y 1, siendo el rango habitual para cubiertas vegetales entre 0,2 y 1. A mayores valores de este índice de vegetación, mayor vigor tendrá la cubierta vegetal.

El NDVI permite identificar las cubiertas vegetales frente al resto de cubiertas, caracterizando su distribución espacial y permitiendo estudiar su evolución en el tiempo (Deblonde y Cihlar, 1993; Gilabert et al., 1997). Al hacer el estudio de éstas, hay que tener en cuenta el ciclo fenológico en el que se encuentre la vegetación y las condiciones climáticas. La vegetación sana, densa y con alto contenido de humedad presentará por tanto mayores valores de NDVI que cubiertas vegetales menos sanas y con menor contenido de humedad. Hay que destacar también, que este índice, tiende a saturarse para valores altos de índice de área foliar (IAF o LAI) (Kemerer et al., 2007; Mefford, 2014). También habría que destacar que está influenciado por las condiciones ópticas del suelo como se ha demostrado en diversos experimentos (Gilabert et al., 1997), es por ello que también se calcularán otros IV que tratan de corregir esta limitación. No obstante hay que mencionar que el NDVI es un buen estimador de actividad fotosintética de la vegetación (Monteith, 1981), la productividad primaria (Paruelo et al., 1998), y una buena herramienta para estimar el estado de los ecosistemas (Virginia y Wall, 2001). El NDVI ha sido utilizado en diferentes estudios para el estudio de la deforestación como hicieron autores como (Coppin y Bauer, 1994 ; Martin y Chuvieco, 1995) en numerosos artículos.

-RENDVI

Rededge Normalized difference Vegetation Index (Gitelson and Marzlyak, 1994), este índice es un índice muy similar al NDVI, pero en su cálculo se utilizan bandas estrechas del RedEdge, sustituyendo así la banda del rojo por una banda en esta región del espectro. Debido a la generalización de observaciones en esta banda espectral, el uso del RENDVI se está a distintas aplicaciones como la agricultura de precisión. Sus valores están normalizados también entre -1 y 1. Considerando también vegetación todo aquello con valores superiores a los 0,2.

El RedEdge, es la región de la curva de reflectancia de la vegetación con máxima pendiente. Se produce entre los 690nm y 740nm de longitud de onda, ya que a estas longitudes de onda la irradiancia tiene mayor capacidad de penetración que en el rojo. Tras realizar diversas pruebas, en el caso de las imágenes Sentinel-2 se utilizarán las bandas del RedEdge 5 y 7, al presentar éstas mayores diferencias de longitud de onda nos darán mayores contrastes en el índice, obteniendo así un índice más sensible a la vegetación que mediante la combinación de las bandas 6 y 7. Esta será la fórmula a utilizar para su cálculo:

$$RENDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RE}}{\rho_{NIR} + \rho_{RE}}$$

En diferentes estudios se ha demostrado que los IV que utilizan el RedEdge son más sensibles al contenido de clorofila y también se han obtenido mejores resultados que con el NDVI para estudios de cultivos (Sharma et al., 2015; Ngie et al., 2014).

-NDII

Normalized Difference Infrared Index, también denominado *Normalized Difference Water Index* (NDWI) y *Normalized Difference Moisture Index* (NDMI) (Hunt y Rock, 1989). A mayores valores de este índice se representará un mayor contenido de agua de las cubiertas vegetales. Este índice es más sensible que el NDVI a la hora de estudiar el stress hídrico de las cubiertas. Es un índice que varía desde -1 a 1, donde las

cubiertas vegetales cogen valores de 0.02 a 0.7 aproximadamente. Esta sería su fórmula, donde se observa ahora la utilización de la banda del SWIR:

$$NDII = \frac{\rho NIR - \rho SWIR}{\rho NIR + \rho SWIR}$$

Para el cálculo de este índice se utilizarán las bandas 8 y 11 de Sentinel-2 pertenecientes al Infrarrojo cercano y al SWIR.

Este índice es muy utilizado para detectar cambios en las cubiertas forestales al ser muy sensible al contenido de agua de estas. Otros estudios han demostrado el potencial de las bandas del SWIR para la detección de cambios en la vegetación (Martín et al., 2002, Pereira et al., 1999b, Rogan y Franklin, 2001). La banda SWIR ha demostrado ser útil para monitorizar las variaciones en el estado de la vegetación a través de imágenes de satélite por su relación con su contenido de humedad (Lasaponara, 2006).

-SAVI

Soil Adjusted Vegetation Index (Huete, 1988), es un índice sensible a la discriminación de la vegetación en zonas de vegetación dispersa dado que trata de corregir la influencia de la reflectividad del suelo. Se incorpora el valor de un parámetro l , para obtener un mejor ajuste, donde l tiene por misión desplazar el punto de convergencia de las isolíneas a la región negativa del plano *NIR-Red*. Al igual que el NDVI se calcula a partir de las bandas del infrarrojo cercano y el rojo, se puede observar su fórmula a continuación:

$$SAVI = \frac{(\rho NIR - \rho R)}{(\rho NIR + \rho R + l)} \cdot (1 + l)$$

El principal problema es determinar el valor de parámetro l de la ecuación, que en principio, puede variar desde 0 a 1. Para ello Huete recomienda los siguientes valores:

- $l = 1$ para densidades de vegetación bajas.
- $l = 0.5$ para densidades de vegetación medias.
- $l = 0.25$ para densidades de vegetación altas.

SAVI es un índice de banda ancha por lo que se utilizarán las bandas anchas de Sentinel-2 para su obtención, para el NIR la banda 8 y para el rojo la banda 4. Se le asignará el valor de 0,25 al parámetro l al considerar la zona de estudio como una zona de vegetación con densidades altas. El SAVI se ha utilizado por autores como Huete(1992), Wang y Xu (2010) y otros muchos más para la detección de cambios.

-Análisis de los IV

Después de proceder al cálculo de los IV para las diferentes fechas se realizará el análisis de estos. Para ello se han seguido los siguientes pasos:

- 1-Cálculo de histogramas de los IV: Se han calculado los histogramas de cada índice de vegetación para las diferentes fechas de abril y junio de 2016 y 2017.
- 2-Tablas de estadísticas básicas para cada IV: Se ha procedido a realizar una tabla para cada IV en cada fecha con sus valores mínimos, máximos, media, desviación estándar y el coeficiente de variación.
- 3-Correlación entre IV: Para el cálculo de las correlaciones entre los diferentes IV, se han calculado los gráficos de correlaciones entre ellos y la matriz de correlaciones, para ver qué tipo de información ofrece cada índice utilizado y determinar si son complementarios o similares.

4.3 TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS

Una vez corregidas y preparadas todas las imágenes se procederá a detallar la metodología empleada. Se analizarán diversas metodologías para el estudio de detección de cambios, como las composiciones visuales con imágenes multitemporales, la diferencia entre imágenes y los componentes principales. En el caso de las composiciones visuales y la diferencia de imágenes se analizarán diferentes bandas y diferentes índices de vegetación para un análisis más completo de los resultados que se pueden obtener con estas metodologías.

Tras analizar todas las imágenes obtenidas y la comparación entre los resultados obtenidos mediante los diferentes métodos, se elegirá el método que mejores resultados de para determinar así la mejor detección de talas forestales para la zona de Guipúzcoa, y se procederá después a realizar el análisis posterior las áreas en las que se han detectados cortas en función de las especies y de las pendientes.


4.3.1 COMPOSICIONES MULTITEMPORALES

Esta técnica se basa en comparar visualmente imágenes de diferentes fechas, combinando en una composición RGB imágenes de una misma banda espectral para las diferentes fechas. Las bandas espectrales para la detección de cambios en la vegetación utilizadas más habitualmente son las bandas del NIR y del SWIR. La interpretación del color dependerá de qué fechas se asignen a cada uno de los colores básicos aunque lo más habitual es asignar el color rojo a la imagen anterior al cambio y el color verde a la imagen posterior al cambio (Chuvieco, 2002).

Previamente también se pueden aplicar técnicas de realce de color, transformaciones como índices de vegetación o componentes principales y hacer con estas bandas derivadas la composición de color. Cada componente de la composición RGB puede ser por tanto un índice de vegetación calculado para las imágenes de las diferentes fechas, asignándole el color rojo y verde a cada índice de vegetación o a la misma banda en diferentes fechas. (2 fechas 2 colores o 3 fechas 3 colores). Lo normal es hacer composiciones con imágenes aniversario en dos fechas y dejar el canal del azul vacío (Chuvieco, 2008).

Chuvieco (2002) propuso diferentes combinaciones con sus posteriores interpretaciones de los colores en los que se detectan los diferentes cambios, la interpretación de los resultados en el caso de la utilización de las bandas del NIR y del SWIR se puede observar en la siguiente tabla 2:

Tabla 2: Interpretación de los colores en los que se detectan los cambios (Chuvieco, 2002)

		Color en pantalla		
Banda espectral		Tonos rojos	Tonos verdes	Tonos amarillos
 SWIR Color en pantalla	Tonos rojos	Suelo a agua	Suelo a vegetación	Suelo seco a húmedo
	Tonos verdes	Vegetación a suelo	Agua a suelo	Suelo húmedo a seco
	Tonos amarillos	Vegetación senescente	Vegetación emergente	Sin cambios

En el caso de este estudio se aplicarán diferentes colores a la misma banda de imágenes aniversario de diferentes años tanto para la imagen de abril como para la de junio. Se analizarán las bandas del NIR (banda 5) y del SWIR (banda 12), para la detección de cambios. Se ha decidido hacer la composición con esta banda NIR de banda estrecha, debido a que tras hacer pruebas con el resto de bandas de esta región (bandas 6, 7, 8 y 8A) no detectan tan bien los cambios en los terrenos forestales mezclándose más tonos de los diferentes estados de la vegetación. Dentro de las bandas que ofrece Sentinel-2 para el SWIR se ha desestimado el uso de la banda 11 debido a las mismas razones y se ha seleccionado la banda 12.

Se aplicará a las imágenes de 2016 el color rojo y a las imágenes de 2017 el color verde del monitor, al color azul del monitor se le aplicará una imagen negra de ceros obteniendo diferentes tonos que los propuestos por Chuvieco ya que desde el software de ENVI utilizado para la realización de las composiciones no da la opción de dejar el color azul del monitor vacío y esta imagen de ceros en tonos negros cambia ligeramente los tonos en los que se detectan los cambios. Para demostrar que mediante índices de vegetación también se pueden detectar los cambios, y ver las diferencias en los resultados obtenidos, se hará lo mismo pero asignándole un color a cada IV calculado para las diferentes fechas. Se realizará una composición con el NDVI, RENDVI y NDII de abril para el año 2016 y 2017 y lo mismo para estos IV en junio para el año 2016 y 2017. En todos los casos la asignación de colores será la siguiente:

Color rojo: imágenes año 2016

Color verde: imágenes año 2017

Color azul: imagen de ceros

Después se analizarán los resultados obtenidos en cada caso y se procederá a su interpretación pero hay que tener en cuenta que al ser una técnica visual no se podrán contrastar los resultados de manera numérica ni se podrá determinar el tamaño de la superficie de cambio, pero sí que se podrá ver la capacidad que tienen las imágenes Sentinel-2 para detectar las talas forestales.

4.3.2 DIFERENCIA DE IMÁGENES

La diferencia entre imágenes es uno de los métodos utilizados junto con el cociente de imágenes, para la detección de cambios en las imágenes. Este método trata de comparar aritméticamente bandas procedentes de dos fechas que sean equiparables radiométricamente, es decir en las mismas bandas del espectro electromagnético. Las zonas estables presentarán valores cercanos a cero en el caso de la diferencia y cercanos a 1 en el caso del cociente. Mientras las zonas en las que se presenten cambios en la imagen presentarán valores completamente diferentes a estos. (Martin y Chuvieco, 1995). Las imágenes diferencia presentan generalmente histogramas con un perfil gaussiano, como el que se observa en la siguiente imagen. Obteniendo las máximas frecuencias en las zonas próximas a 0 (donde no se producen variaciones), quedando los cambios recogidos en los lados del histograma, dependiendo del signo de cambio (González, 2016).

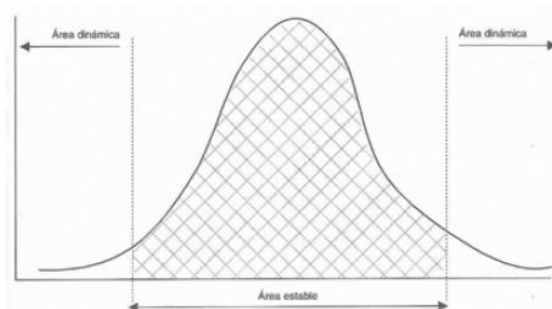


Figura 13: Histograma que presentan las imágenes diferencia (fuente: Gonzalez, 2016)

El estudio de este histograma permite determinar los umbrales que separarán las áreas estables de las dinámicas. Lo difícil en estos casos es determinar con exactitud el umbral de cambio, esto se puede hacer mediante trabajo de campo, datos de apoyo auxiliares o visualmente. Pero debido a la dificultad de exactitud en este umbral será importante considerar los posibles errores de comisión u omisión en función del valor estimado para este umbral. Para determinar este umbral se han realizado diferentes pruebas ajustando en cada caso el umbral con el que mejores resultados se han obtenido.

Este método se puede emplear a nivel de reflectancia, índices de vegetación o parámetros texturales. También es muy importante seleccionar la banda espectral, IV o parámetro textural a utilizar para comparar las imágenes entre sí. Lo mejor sería utilizar el parámetro o la banda que ofrezca mayor separabilidad para la detección de las talas forestales. En el caso de los índices de vegetación como los resultados dependen mucho del entorno, será muy importante utilizar imágenes aniversario para minimizar las diferencias en el ciclo fenológico de las cubiertas.

Por ello tras analizar diferentes estudios y comprobar en el análisis visual realizado anteriormente los diferentes resultados obtenidos, se utilizarán las bandas del SWIR y del NIR (bandas relacionadas con la vegetación) y los índices antes calculados NDVI, RENDVI, SAVI y NDII. Como se ha definido antes y tras hacer la prueba en ambas fechas con la banda del SWIR, se ha decidido realizar la diferencia entre imágenes aniversario de junio, para detectar mayor cantidad de talas forestales, ya que en el mes de abril muchas de las talas aún no han sido realizadas. A la hora de determinar la diferencia entre imágenes, se restará en todos los casos a la imagen de 2017 la de 2016.

Después se procederá al análisis de las imágenes diferencia obtenidas, se determinará el umbral establecido en cada caso, la superficie de cambio detectado y el porcentaje de acierto de cada método con el apoyo de los datos de talas que se disponía inicialmente. También se han analizado los resultados de la siguiente manera:

1-Cálculo de histogramas: Se han calculado los histogramas de cada imagen diferencia obtenida para delimitar el umbral de cambio para cada una de ellas. Después se han superpuesto los histogramas de todas las imágenes diferencia para hacer un análisis más detallado de estos.

2-Tablas de estadísticas básicas para cada imagen diferencia: Se ha procedido a realizar una tabla para imagen con sus valores mínimos, máximos, media, desviación estándar y el coeficiente de variación.

3-Correlación entre imágenes diferencia: Se han calculado los gráficos de correlaciones entre ellos y la matriz de correlaciones, para ver qué tipo de información ofrece la imagen diferencia obtenida con cada índice utilizado y si son complementarios o similares.

4.3.4 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

El análisis de componentes principales (ACP), es una técnica estadística que sintetiza la información de las bandas originales que estaban correlacionadas entre sí, creando nuevas bandas independientes entre sí, los componentes principales (CP), que reorganizan y recogen la información original de las bandas. En las primeras componentes se recogerá la información común entre bandas, y en la segunda o tercera componentes se recogerá la información no común a todas las bandas, en este caso la información que interesa para detectar los cambios (Gonzalez, 2016).

La capacidad de síntesis del ACP, hacen de Ésta una técnica muy efectiva como filtro previo del análisis multitemporal de cambios, reteniendo información significativa de cada fecha y combinando ésta en sus CP con el fin de facilitar una mejor detección de tipos de coberturas y cambios en el suelo (Joly et al., 1983; Maselli et al., 1995; Siljestrom y Moreno, 1995). Es una buena herramienta para estudiar series temporales para el estudio del cambio global de la vegetación, obteniendo así las tendencias generales de diferentes coberturas muy útiles para detectar anomalías (Eastman y Fulk, 1993).

En el caso de la detección de cambios las bandas de entrada serán las bandas de interés de las imágenes de las fechas en las que se quieran detectar los cambios. Por lo que en este caso, se creará una única

imagen con todas las bandas para junio 2016 y 2017. Por lo que la imagen de partida será una imagen con 20 bandas para la que se calcularán las estadísticas. Las bandas 1 a 10 serán las 10 primeras bandas de la imagen de junio de 2016 y las bandas 11 a 20 serán las 10 primeras bandas de la imagen de junio 2017.

Véase en la figura 14, el esquema que muestra el procedimiento de cálculo en el análisis de los componentes principales. El primer paso será calcular la matriz de varianza/covarianza en el caso de que la variabilidad entre las bandas sea muy distinta o la matriz de correlación si estas son muy similares.

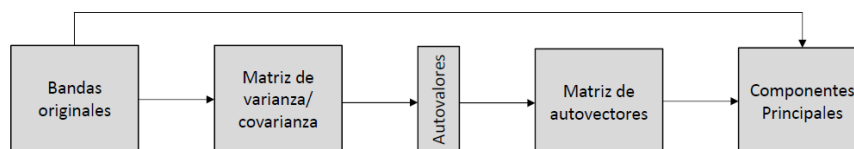


Figura 14: Procedimiento de calculo de los CP (Audicana,2016).

Esta composición de imágenes multitemporales tiene información redundante en todas las zonas donde no se han producido cambios. Se observan valores de estadísticas muy diferentes en la desviación estándar, así que se partirá de la matriz de varianza/covarianza. Se analizarán los autovalores o eigenvalues para calcular el porcentaje de varianza de cada CP, ya que estos indican la ponderación que se aplica al ND de cada una de las bandas para la obtención de cada CP. Después de calcular los autovalores se procederá al cálculo de los autovectores a partir de la matriz de varianza/covarianza, teniendo en cuenta el valor del autovalor calculado previamente para cada CP ya que indicarán la ponderación que hay que aplicar al ND de cada una de las bandas para obtener así cada CP. También mediante el análisis de éstos se puede hacer una interpretación de en qué CP estarán recogidas las zonas de cambio.

Después de seguir la metodología arriba descrita se procederá al análisis de los resultados obtenidos para el ACP, siguiendo los siguientes pasos:

1-Cálculo de histogramas: Se calcularán los histogramas de las diferente CP, para ver la información que recoge cada una de ellas.

2-Tablas de Autovalores: Se calculará el coeficiente de varianza de cada componente principal y se analizara el valor de los autovalores para cada CP.

3-Tabla de Autovectores: Se hará un análisis de los autovectores de cada CP para, identificar la CP en la que se recogen los cambios.

4- Análisis visual de las CP: Se representarán visualmente los resultados obtenidos.

5-Detección de cambios: Después de detectar la CP en la que se recogen los cambios se establecerá un umbral para detectar los píxeles que pertenezcan a la pérdida de masa forestal y se procederá a hacer un análisis de los resultados.

6-Correlación: Se analizará la correlación entre la CP6 y las imágenes diferencia de cambios calculadas.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS

5.1.1 ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Después de proceder al cálculo de los IV para las diferentes fechas, se procederá a hacer el análisis de éstos:

-Distribución de los IV:

Se han calculado los histogramas de cada índice de vegetación para las diferentes fechas de abril y junio de 2016 y 2017. A continuación se muestran los histogramas de toda la zona de estudio en las siguientes figuras.

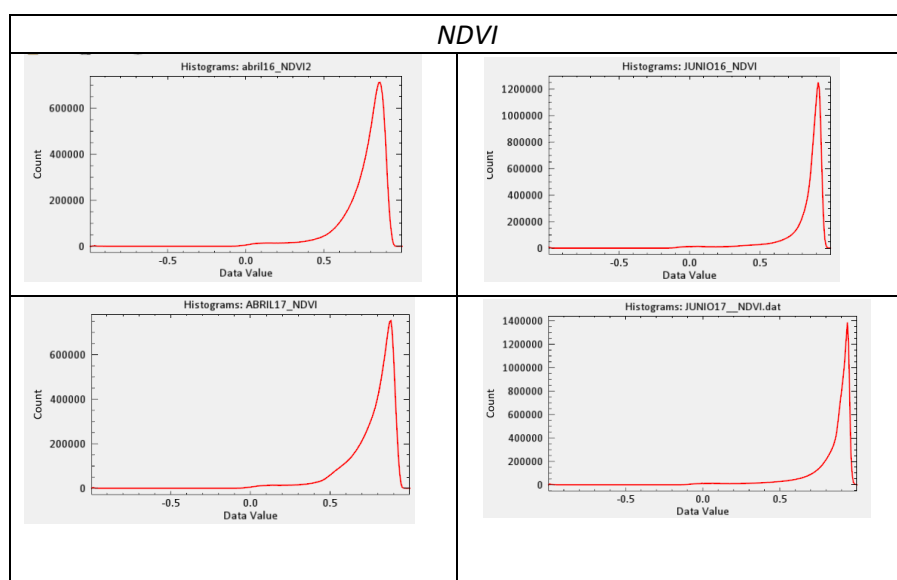


Figura 15: Histogramas del NDVI para abril 2016, junio 2016, abril 2017 u junio 2017 (de izquierda a derecha y de arriba a abajo).

Los histogramas del NDVI presentan la mayoría de valores a partir de los 0,5 muy cerca de los valores próximos a 1. Los índices de abril tienen mayor rango que los de junio.

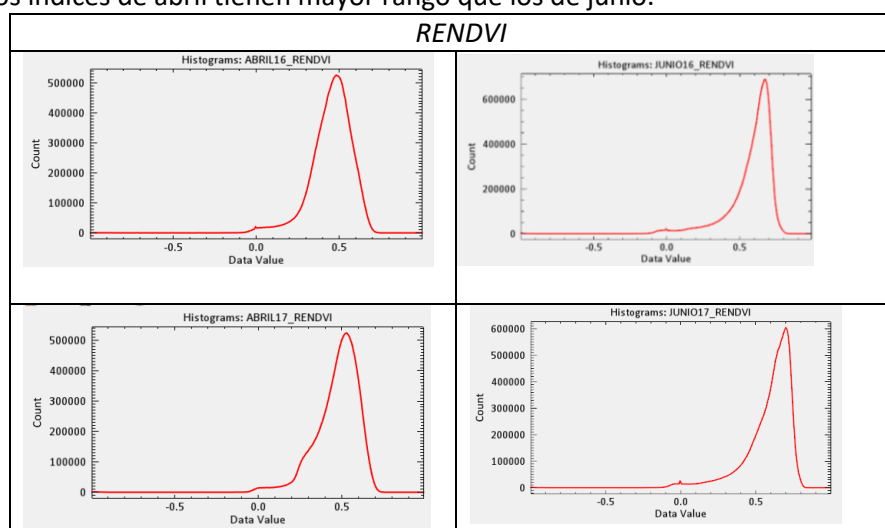


Figura 16: Histogramas del RENDVI para abril 2016, junio 2016, abril 2017 u junio 2017 (de izquierda a derecha y de arriba a abajo).

i

En el caso del RENDVI la distribución del histograma cambia un poco (Fig. 17), los valores más altos de este índice se dan en torno a los 0,5 y se observa un pequeño pico en el 0. De nuevo los valores de abril presentan mayor rango que los de junio.

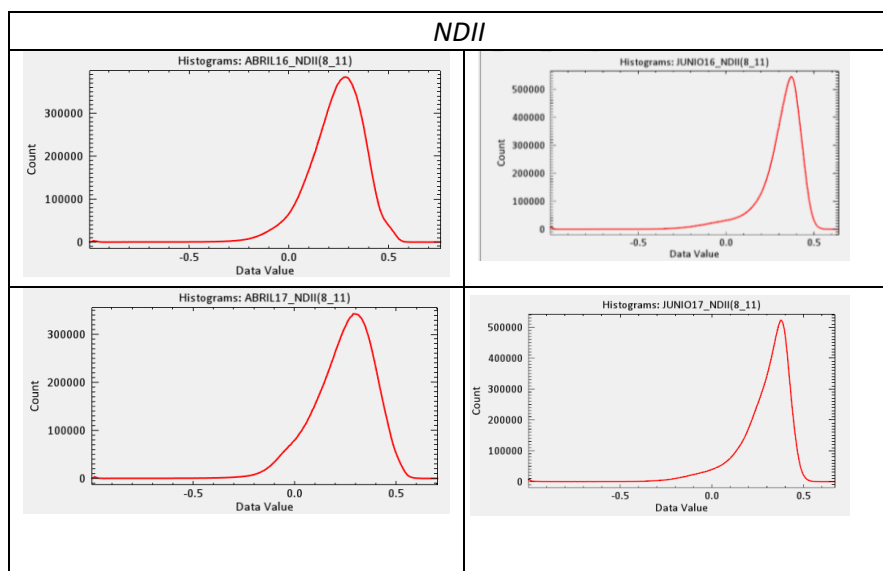


Figura 17: Histogramas del NDVI para abril 2016, junio 2016, abril 2017 u junio 2017 (de izquierda a derecha y de arriba abajo).

El NDII es el índice que mayor rango presenta de todos (Fig. 18), se ve una notable diferencia en los valores de abril. En junio este rango sigue siendo mayor que en el de resto de índices pero disminuye comparándolo con los histogramas de abril. En este caso la mayoría de valores está en torno a los 0,25.

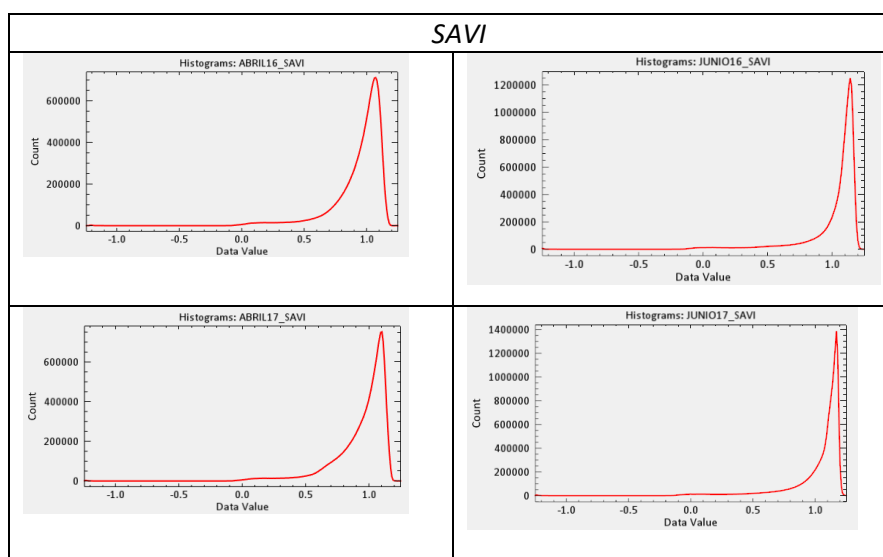


Figura 18: Histogramas del SAVI para abril 2016, junio 2016, abril 2017 u junio 2017 (de izquierda a derecha y de arriba abajo).

El SAVI (Fig. 19), al igual que el RENDVI presenta un pequeño pico en torno al 0, aunque en junio no se aprecia prácticamente nada al disminuir el rango de este. En este caso la mayoría de valores esa en torno al 1 para abril y 1,25 para junio. Se observa que la proporción de píxeles que presentan estos valores máximos son mayores que con los otros IV.

En la siguiente figura 19 se pueden observar los valores de los histogramas superpuestos en junio de 2017, para apreciar mejor las diferencias entre ellos. Los histogramas que mayor rango de valores

presentan son los del RENDVI, seguidos del NDII y los que tienen más cantidad de valores en pico máximo serán el NDVI y el SAVI

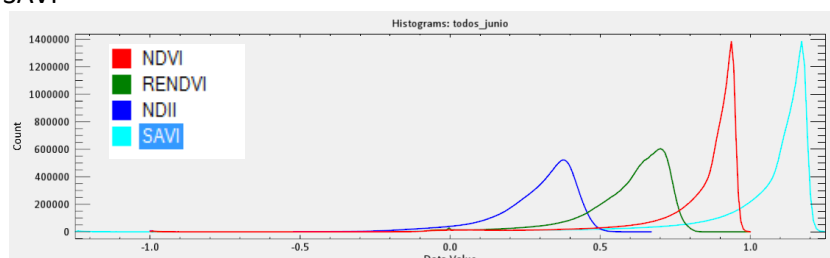


Figura 19: Histogramas de los IV superpuestos para junio de 2017.

-Tablas de estadísticas básicas para cada IV:

Se ha procedido a realizar una tabla para cada IV en cada fecha con sus valores mínimos, máximos, media, desviación estándar y el coeficiente de variación.

Tabla 3: Estadísticas básicas de los IV.

	Min	Max	Mean	StdDev	C.V. %
NDVI					
abril 16	-0,994475	0,999474	0,754844	0,167071	22,13
junio16	-0,997163	0,999499	0,818865	0,188136	22,98
abril17	-0,996124	0,9997	0,758717	0,170872	22,52
junio17	-0,998939	0,999741	0,828269	0,190729	23,03
NDII					
abril 16	-0,997709	0,760502	0,240905	0,141043	58,55
junio16	-0,998962	0,639344	0,306166	0,140134	45,77
abril17	-0,998734	0,710925	0,244545	0,152588	62,40
junio17	-0,998981	0,669512	0,28985	0,146299	50,47
RENDVI					
abril 16	-0,997805	0,999623	0,456694	0,124457	27,25
junio16	-0,996303	0,997337	0,582835	0,155098	26,61
abril17	-0,99422	0,989796	0,475825	0,130412	27,41
junio17	-0,997183	0,997906	0,591404	0,157629	26,65
SAVI					
abril 16	-1,242236	1,249260	0,943485	0,208769	22,13
junio16	-1,246012	1,249296	1,023519	0,235112	22,97
abril17	-1,244552	1,249578	0,948327	0,213551	22,52
junio17	-1,248508	1,249636	1,035278	0,238339	23,02

Analizando los datos, el índice que presenta mayor coeficiente de variación (C.V.) es el NDII con valores muy superiores a los demás índices entre el 40 y 60%. Después, pero con valores muy inferiores en torno al 26-27%, se encuentra el RENDVI. EL NDVI y el SAVI presentan coeficientes de variación entorno al 22-23%. A mayor valor del coeficiente de variación mayor heterogeneidad del IV, por lo que mayor será la dispersión de ese IV, y a menor C.V., mayor será la homogeneidad.

Se estudiarán gráficamente estos valores máximos y medios para analizar más detalladamente estos valores. En el siguiente gráfico (Fig. 20) se puede observar los valores medios de los diferentes índices en las diferentes fechas para las que se ha realizado el cálculo de estos.

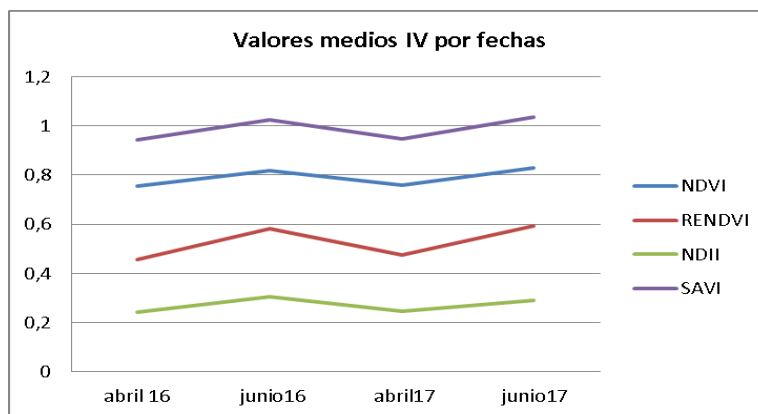


Figura 20 :Gráfico de los valores medios de los IV.

Como se puede observar en la figura 21 , todos los índices tienen la misma tendencia aunque su rango de valores sea diferente. La tendencia general de estos es subir entre abril y junio tanto para el año 2016 como para el 2017. Esto es debido a que la cubierta vegetal aumenta en junio debido al crecimiento de la vegetación para esta época. En cuanto a los datos de los IV en las diferentes fechas aniversario, se observa un pequeño aumento en los valores medios de los IV para el año 2017 en ambas fechas salvo en el caso del NDII en el que los valores de Junio para el 2017 disminuyen los valores medios de este índice esto puede ser debido a una disminución en las precipitaciones para ese año.

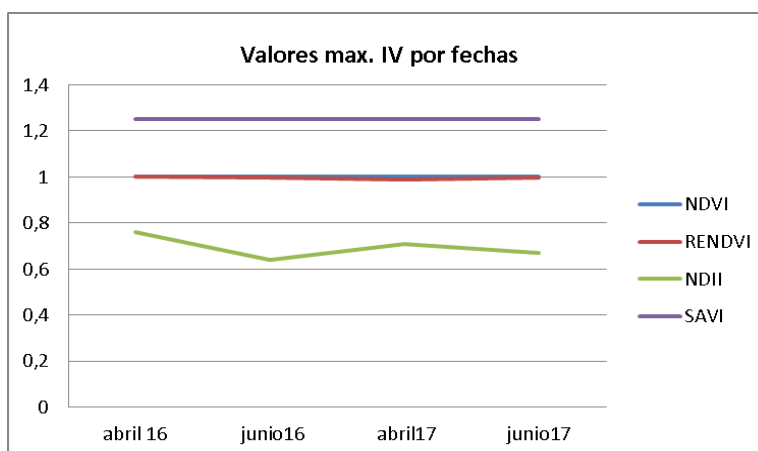


Figura 21 : Gráfico de los valores máximos de los IV.

Observando los valores máximos de los índices de vegetación se observa la misma tendencia entre todos salvo en el NDII en el que se observan mayores diferencias, estos valores descienden para los meses de junio y aumentan en abril. La diferencia se ve mayor en el 2016 que en el 2017, ya que en 2016 los valores máximos son mayores y los mínimos más bajos.

Se puede decir que los IV tienen la misma tendencia en los valores mínimos y no cambian prácticamente nada

-Correlación entre IV:

Para el cálculo de las correlaciones entre los diferentes IV, se han calculado los gráficos de correlaciones entre los índices de junio 2017 para hacer un análisis previo visual de ellos y la matriz de correlaciones entre todos los IV para todas las fechas, con el objetivo de ver qué tipo de información ofrece cada índice utilizado si son complementarios o similares.

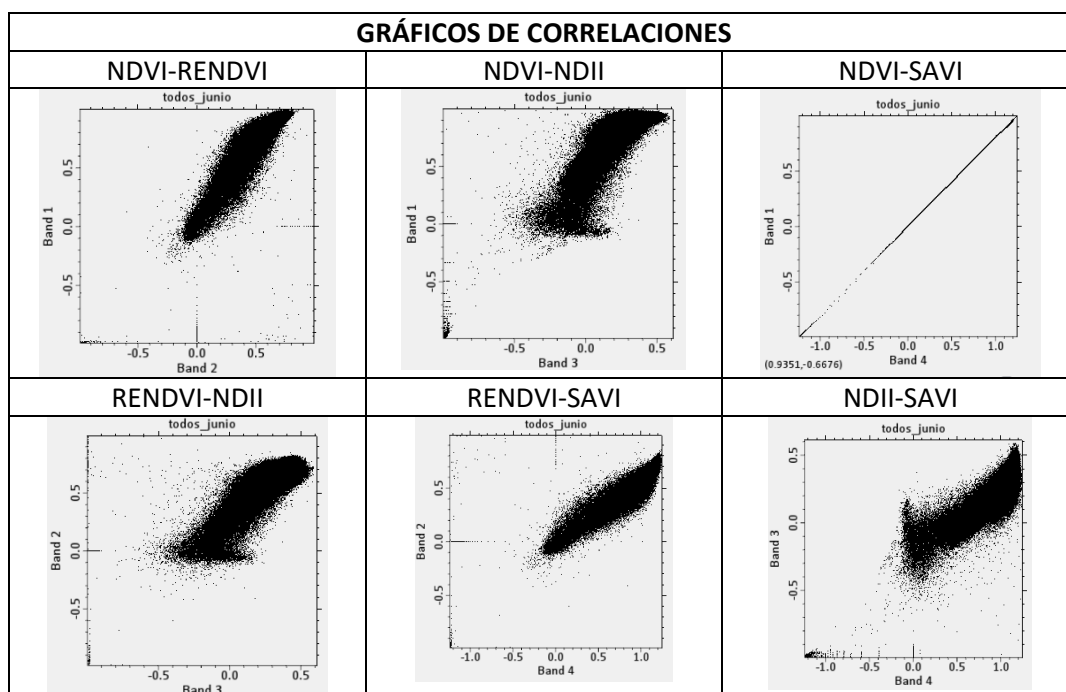


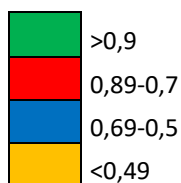
Figura 22: Gráficos de correlaciones entre IV.

Como se puede observar en la figura 22 las mayores correlaciones se producen entre el NDVI y el SAVI, seguidas luego del RENDVI con el SAVI y el NDVI, entre el resto de IV se observan en los “scatterplots” bastante dispersión entre los valores. En las diferentes fechas se repite este patrón como se puede ver en la tabla 4, donde se puede observar con mayor exactitud de los valores de la matriz de correlaciones entre los diferentes índices en las diferentes fechas.

Tabla 4: Matriz de correlaciones entre IV.

		abril16				abril17				junio16				junio17			
		NDVI	RENDVI	NDII	SAVI	NDVI	RENDVI	NDII	SAVI	NDVI	RENDVI	NDII	SAVI	NDVI	RENDVI	NDII	SAVI
abril16	NDVI	1,00	0,86	0,83	1,00	0,85	0,74	0,66	0,85	0,77	0,70	0,65	0,77	0,74	0,66	0,60	0,74
	RENDVI	0,86	1,00	0,78	0,86	0,77	0,83	0,68	0,77	0,57	0,55	0,49	0,57	0,54	0,49	0,42	0,54
	NDII	0,83	0,78	1,00	0,83	0,69	0,64	0,76	0,69	0,50	0,46	0,56	0,50	0,47	0,42	0,50	0,47
	SAVI	1,00	0,86	0,83	1,00	0,85	0,74	0,66	0,85	0,77	0,70	0,65	0,77	0,74	0,66	0,60	0,74
abril17	NDVI	0,85	0,77	0,69	0,85	1,00	0,89	0,83	1,00	0,71	0,63	0,60	0,71	0,73	0,64	0,61	0,73
	RENDVI	0,74	0,83	0,64	0,74	0,89	1,00	0,83	0,89	0,54	0,50	0,47	0,54	0,55	0,49	0,46	0,55
	NDII	0,66	0,68	0,76	0,66	0,83	0,83	1,00	0,83	0,42	0,36	0,49	0,42	0,44	0,37	0,49	0,44
	SAVI	0,85	0,77	0,69	0,85	1,00	0,89	0,83	1,00	0,71	0,63	0,60	0,71	0,73	0,64	0,61	0,73
junio16	NDVI	0,77	0,57	0,50	0,77	0,71	0,54	0,42	0,71	1,00	0,92	0,88	1,00	0,89	0,82	0,76	0,89
	RENDVI	0,70	0,55	0,46	0,70	0,63	0,50	0,36	0,63	0,92	1,00	0,85	0,92	0,83	0,88	0,75	0,83
	NDII	0,65	0,49	0,56	0,65	0,60	0,47	0,49	0,60	0,88	0,85	1,00	0,88	0,77	0,73	0,83	0,77
	SAVI	0,77	0,57	0,50	0,77	0,71	0,54	0,42	0,71	1,00	0,92	0,88	1,00	0,89	0,82	0,76	0,89
junio17	NDVI	0,74	0,54	0,47	0,74	0,73	0,55	0,44	0,73	0,89	0,83	0,77	0,89	1,00	0,92	0,88	1,00
	RENDVI	0,66	0,49	0,42	0,66	0,64	0,49	0,37	0,64	0,82	0,88	0,73	0,82	0,92	1,00	0,86	0,92
	NDII	0,60	0,42	0,50	0,60	0,61	0,46	0,49	0,61	0,76	0,75	0,83	0,76	0,88	0,86	1,00	0,88
	SAVI	0,74	0,54	0,47	0,74	0,73	0,55	0,44	0,73	0,89	0,83	0,77	0,89	1,00	0,92	0,88	1,00

Tras analizar los valores de toda la tabla 4, se han marcado en diferentes colores las correlaciones entre los IV de cada fecha en función de su nivel de correlación agrupándolos de la siguiente manera:



En abril las correlaciones más altas se dan entre el NDVI y el SAVI en la misma fecha tanto para 2016 como para 2017 con una correlación de 1 (por lo que estos índices proporcionan la misma información). Comparando los valores de 2016 con los de 2017 las mayores correlaciones se dan en el NDVI con el SAVI y con el NDVI de fechas diferentes con valores en torno a los 0,85. Si se comparan las imágenes de abril con las de junio se observa como el coeficiente de correlación decae notablemente, dándose correlaciones más altas entre el NDVI y el SAVI con valores en torno a los 0,77 para abril16-junio16 y en torno a los 0,73 para junio17. Los valores de junio17 mantienen la misma correlación para abril 16 y 17, en cambio los de junio 16 descienden con abril 17 a valores de 0,10 dándose entre estas fechas las correlaciones más bajas entre este conjunto de imágenes. En junio ocurre lo mismo, las correlaciones entre el NDVI y el SAVI son las más altas tanto para junio de 2016 como junio de 2017 con valores de 0,99. Analizando las correlaciones entre junio16 y 17 se observa como al igual que ocurría entre junio y abril las correlaciones más altas se dan con el NDVI-NDVI NDVI-SAVI y SAVI-SAVI con valores en torno a los 0,89.

5.1.2 COMPOSICIONES MULTITEMPORALES

Para realizar el análisis de las diferentes composiciones multitemporales realizadas se mostrarán los resultados obtenidos en el siguiente orden:

- Imágenes de las composiciones con las bandas del SWIR, NIR, NDVI, RENDVI y NDII.
- Análisis de las imágenes.

-Imágenes obtenidas:

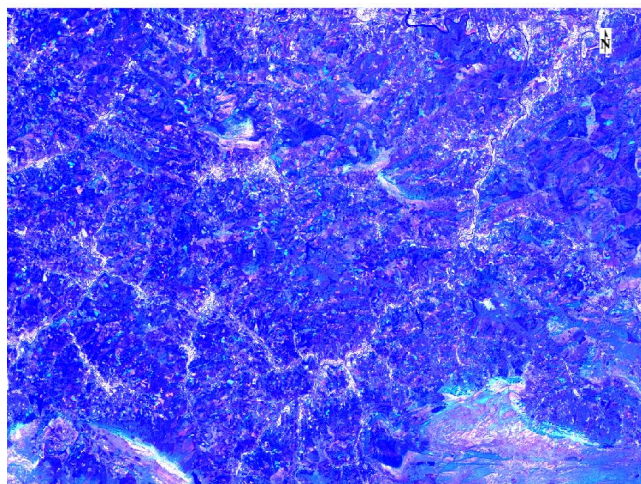


Figura 23: Imagen de cambios abril banda SWIR.

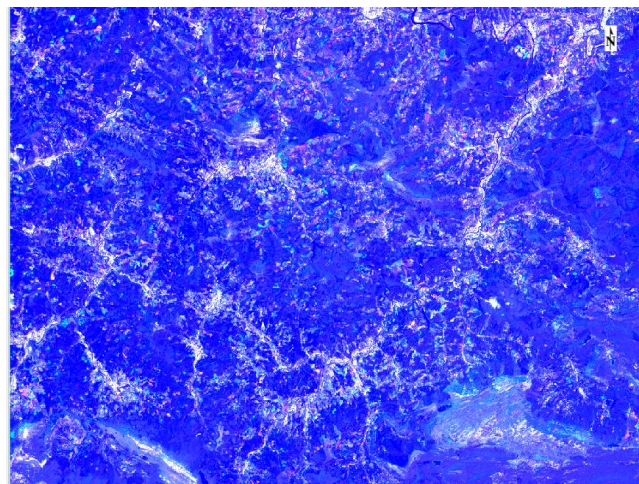


Figura 24: Imagen de cambios junio banda SWIR.

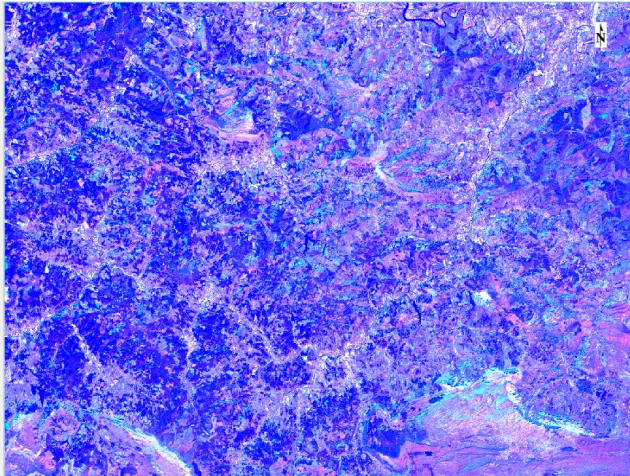


Figura 25: Imagen de cambios abril banda NIR.

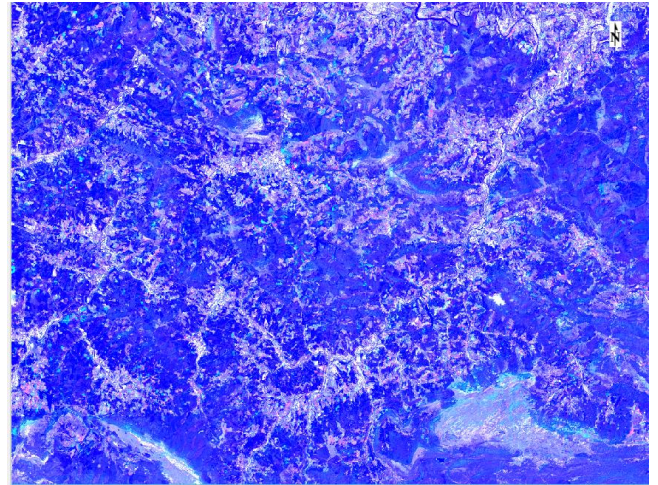


Figura 26: Imagen de cambios junio banda NIR.

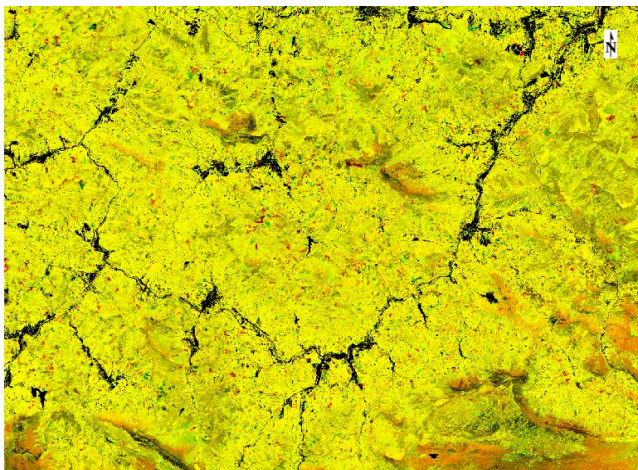


Figura 27: Imagen de cambios NDVI abril.

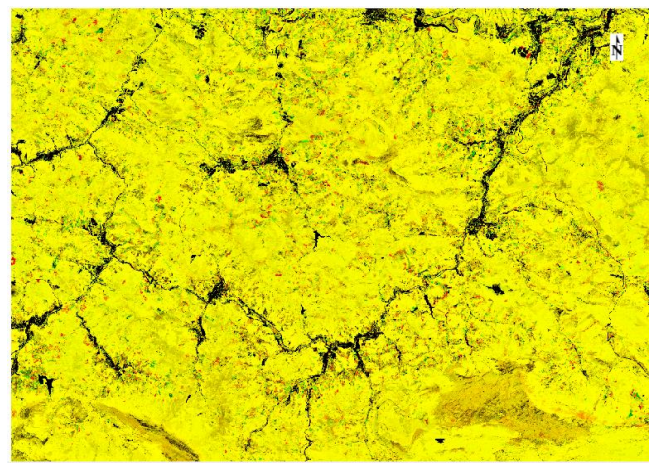


Figura 28: Imagen de cambios NDVI junio.

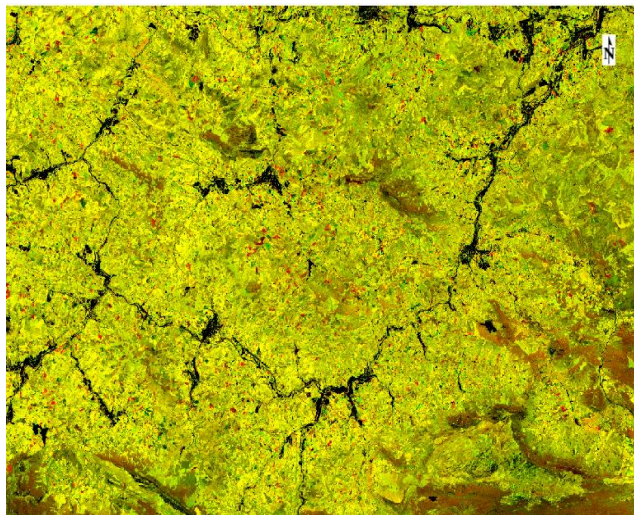


Figura 29: Imagen de cambios RENDVI abril.

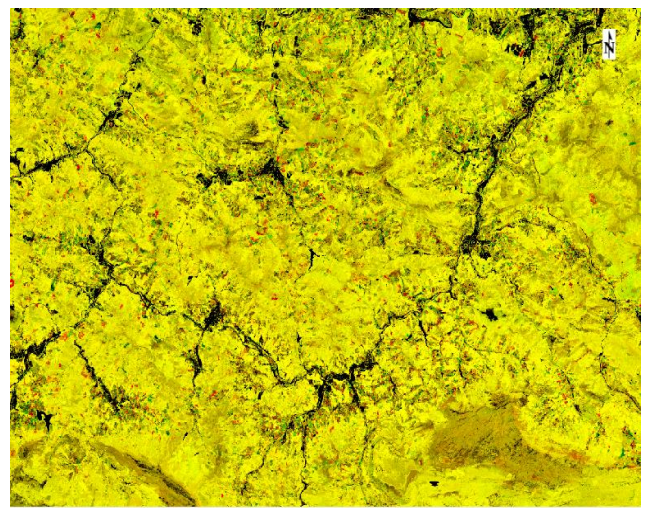


Figura 30: Imagen de cambios RENDVI junio.

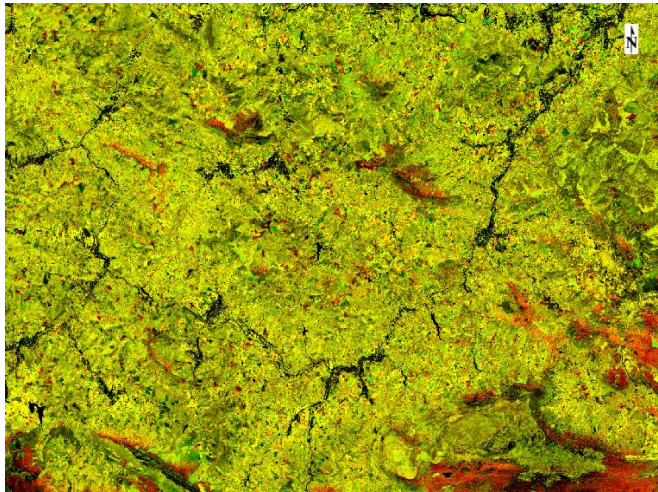


Figura 31 : Imagen de cambios NDII abril.

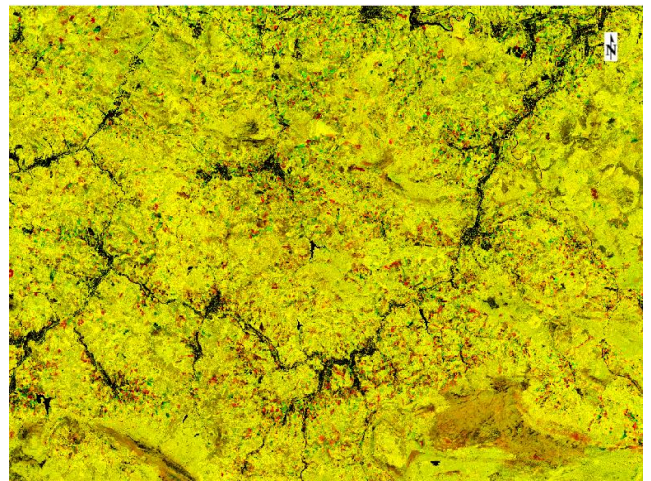


Figura 32 : Imagen de cambios NDII junio.

-Análisis de las imágenes:

Se mostrará una imagen más detallada a escala más grande de zonas concretas de tala, para realizar un análisis más exhaustivo de los resultados, puesto que con la imagen completa no se pueden apreciar bien a que pertenecen los tonos de las imágenes.

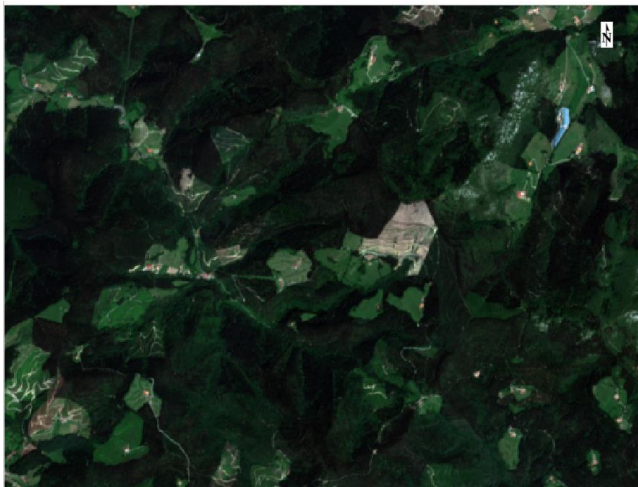


Figura 33: Imagen junio 16 pre-tala.

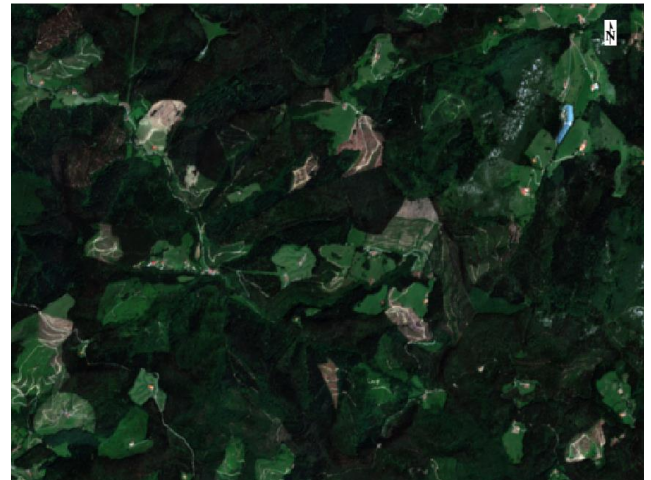


Figura 34: Imagen junio 17 post-tala.

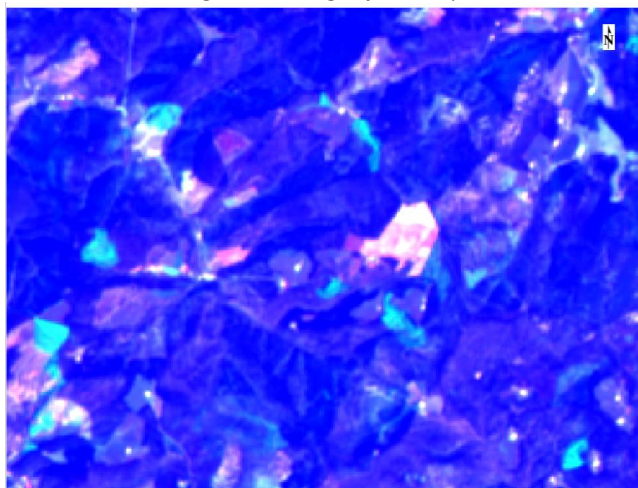


Figura 35: Imagen detalle de cambios abril banda SWIR.

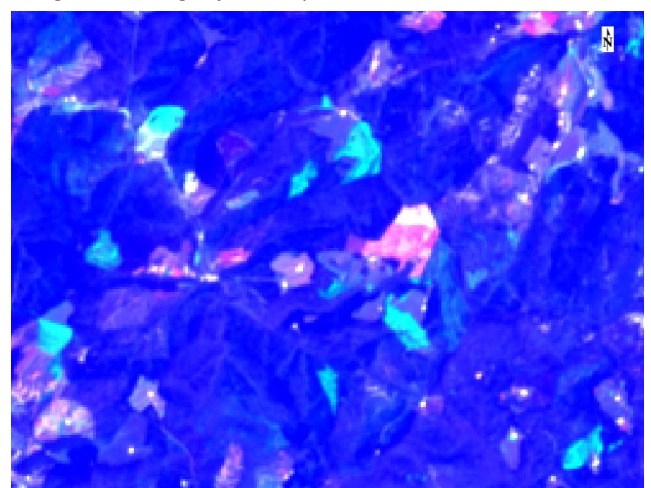


Figura 36: Imagen detalle de cambios junio banda SWIR.

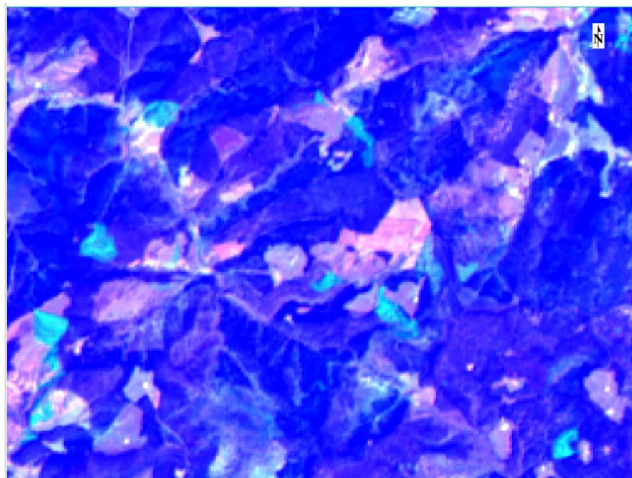


Figura 37: Imagen detalle de cambios abril banda NIR.

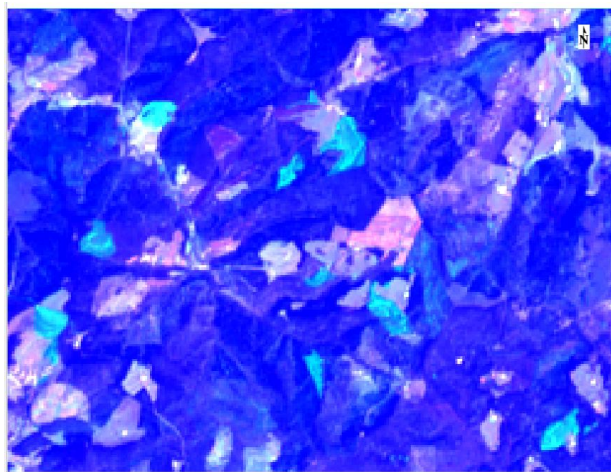


Figura 38: Imagen detalle de cambios junio banda NIR.

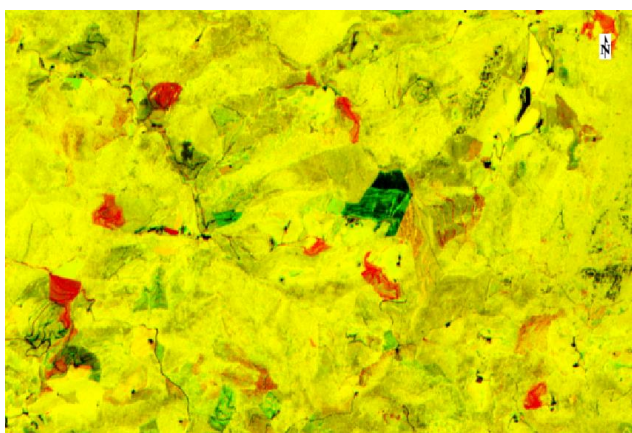


Figura 39 : Imagen detalle de cambios NDVI abril.

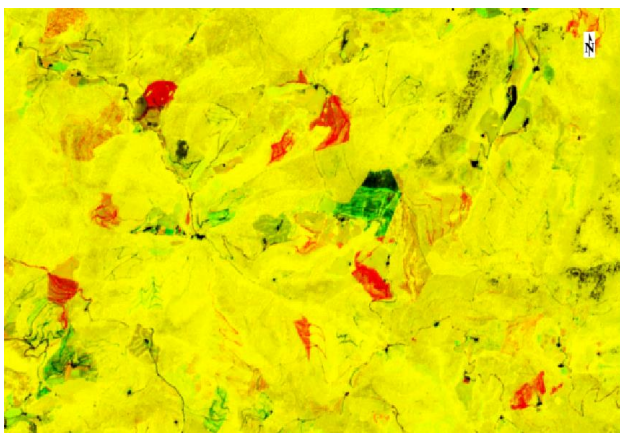


Figura 40: Imagen detalle de cambios NDVI junio.

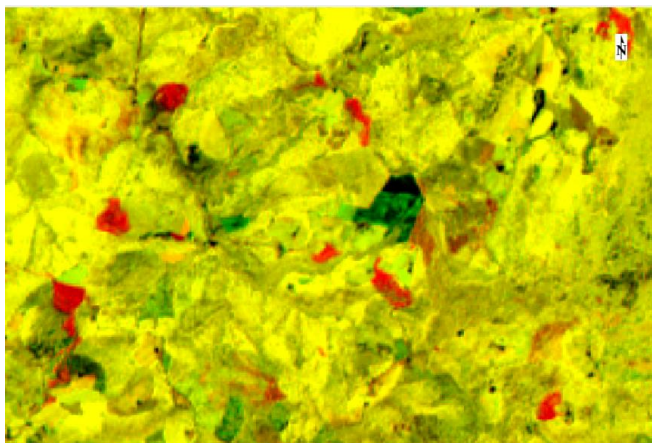


Figura 41 : Imagen detalle de cambios RENDVI abr

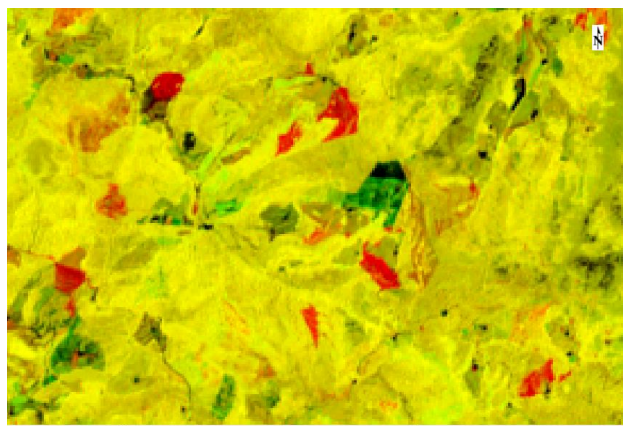


Figura 42: Imagen detalle de cambios RENDVI junio

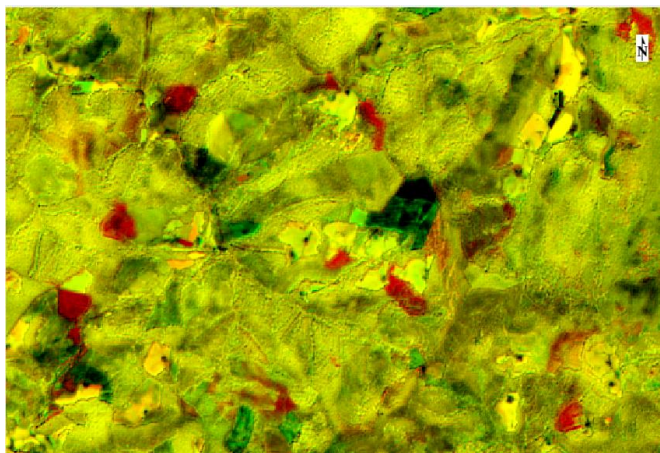


Figura 43 : Imagen detalle de cambios NDII abril.

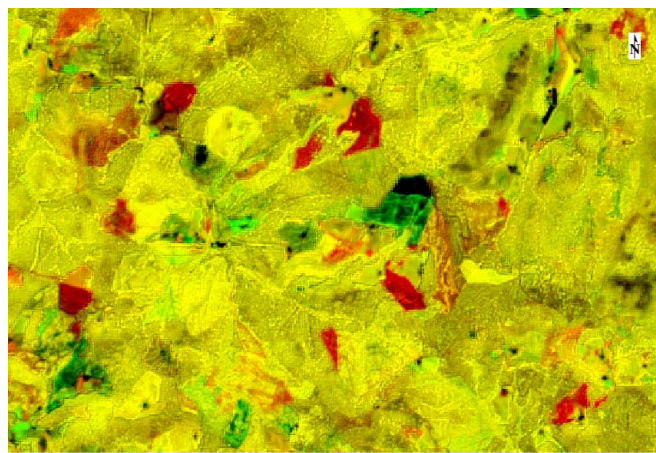


Figura 44 : Imagen detalle de cambios NDII junio

En la imágenes de Junio se observan talas que no se han detectado en la imágenes de abril, ya que no estarían realizadas. También se observan diferencias en la vegetación debido al estado en el que se encuentra el terreno para las diferentes épocas. (Por lo general en Junio el crecimiento de la vegetación creciente tras la tala esta más avanzado). Se obseva como en la imagen de abril y en la de junio se detectan los cambios sin ningún problema.

Utilizando las bandas del SWIR para hacer las composiciones de color, se observa que las cortas se detectan en azul claro y las zonas donde había talas previas y ha comenzado a salir la vegetación se detectan en colores rojos. Esto es debido a que la reflectancia en el SWIR tiene una relación inversa con la cantidad de vegetación. Las áreas urbanas de estas composiciones entre bandas se observan de colores blancos tanto para el NIR como para el SWIR.

En la composición de colores del NIR, al igual que en la del SWIR las talas aparecen de color azul claro, y las zonas donde se esta reforestando el terreno de tonos más rojizos o azules claros más suaves, si el crecimiento de la vegetación es más suave. Se observa que el NIR es más sensible a los cambios en los estados de la vegetación y aparecen más tonos rojizos en función del estado de las cubiertas, dandose más cambios en la imagen. Ambas imágenes son muy parecidas aunque debido al estado de las cubiertas en junio se ve mayor contraste en la imagen.

El análisis visual de la deteccion de cubiertas de cortas es más difícil en las bandas del NIR en comparación con los resultados obtenidos para las bandas del SWIR ya que en el SWIR se detectan directamente los cambios bruscos y solo aparecen de tonos rojizos las zonas en las que se ha producido una corta y se esta reforestando a diferencia del NIR en la que se aprecian visualmente pequeños cambios en el estado de la vegetación. Y en cuanto a la época del año se observa como en la imagen de junio debido al estado de la vegetación se observa mayor contraste en las imágenes viendose mayores cambios.

En el caso de los IV se observa como las áreas urbanas y el asfalto las visualiza de colores oscuros negros y marrones, en general se ven tonos más oscuros amarillos verdachos y más marrones en la imagen de abril debido a los cambios en la vegetación ya que en la época de primavera es cuando empiezan a rebrotar las hojas de los árboles y de un año a otro se pueden dar diferencias en el crecimiento de las especies. Por lo que en la diferencia entre las composiciones de junio y de abril se aprecian mayor contraste en todas las imágenes de junio.

Se observa también que las zonas en las que se ha producido una tala se distinguen fácilmente puesto que destacan en granate oscuro, y las zonas que se están reforestando salen en tonos verdes. Se aprecia que se distingue mejor el contorno de la masa que en las composiciones entre las bandas del SWIR y del NIR,

ya que con el NDVI se define mejor la forma del área talada. Al aparecer el resto de la imagen en tonos amarillentos también se aprecia mejor el contraste visual.

En el caso de los IV, se puede observar (Fig.45-49) como en el caso de masas forestales caducifolias como la imagen de abril puede dar pie a cambios en tonos rojizos más intensos debido a la diferencia en los valores de los IV de los árboles al no tener hoja en el año 2017 y en cambio aparecer con hoja en la imagen del abril de 2017 (dependiendo de las temperaturas de cada año se puede adelantar el crecimiento de la hoja para esta época).

Esta diferencia se hace más notable al utilizar el NDII, seguido después del RENDVI que en el NDVI, al presentar estos índices mayor rango de variación. Por lo que para el análisis será mejor utilizar las imágenes de junio, con el follaje plenamente desarrollado, para que el contraste de las zonas con tala sea más evidente y se aprecien menos los cambios debidos a la fenología. Lo ideal para ello es usar siempre imágenes aniversario pero se observa que aun así la elección del mes en el que se analice la imagen también tiene gran importancia. Se verá el ejemplo de un bosque de Hayas en la zona del Txindoki con pendientes muy fuertes.(Figuras 45-49)



Figura 45:Imagen detalle abril 16 (izquierda) -abril 17 (derecha).



Figura 46 :Imagen detalle juniol 16 (izquierda) -junio 17 (derecha).

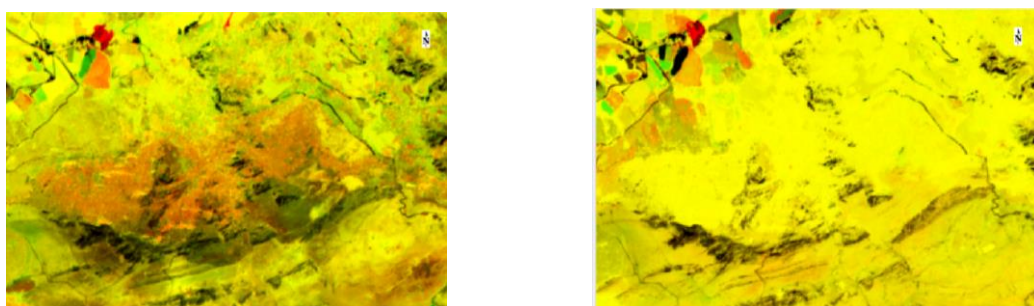


Figura 47 : Imagen detalle composición NDVI abril (izquierda) -NDVI Junio(derecha).

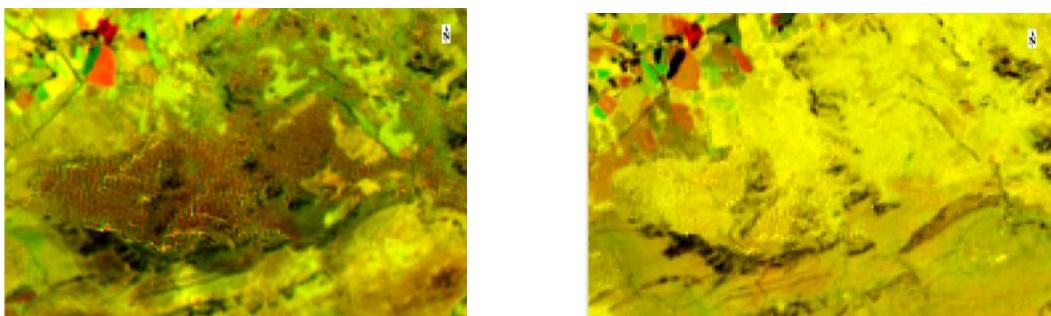


Figura 48: Imagen detalle composición RENDVI abril (izquierda) -RENDVI Junio(derecha).

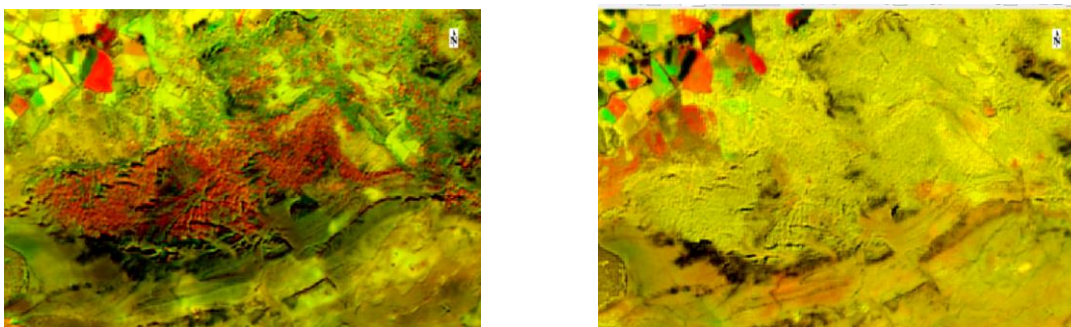


Figura 49: Imagen detalle composición NDVI abril (izquierda) -NDVI Junio(derecha).

5.1.3 DIFERENCIA DE IMÁGENES

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos tras realizar la diferencia entre imágenes explicada anteriormente en la metodología. Se procederá a un primer estudio de los resultados y se visualizará el histograma de las imágenes obtenido en cada caso con el umbral óptimo determinado en cada uno de ellos y con la determinación de los píxeles detectados como corta en cada caso. Después en otro apartado posterior se analizarán más en detalle los resultados obtenidos.

SWIR

A continuación se muestran los resultados obtenidos al restar las imágenes en las diferentes fechas para la banda del SWIR para toda la zona (Fig.50) y para una zona de detalle (Fig. 53) donde se pueden apreciar las zonas de cambio con mayor claridad.

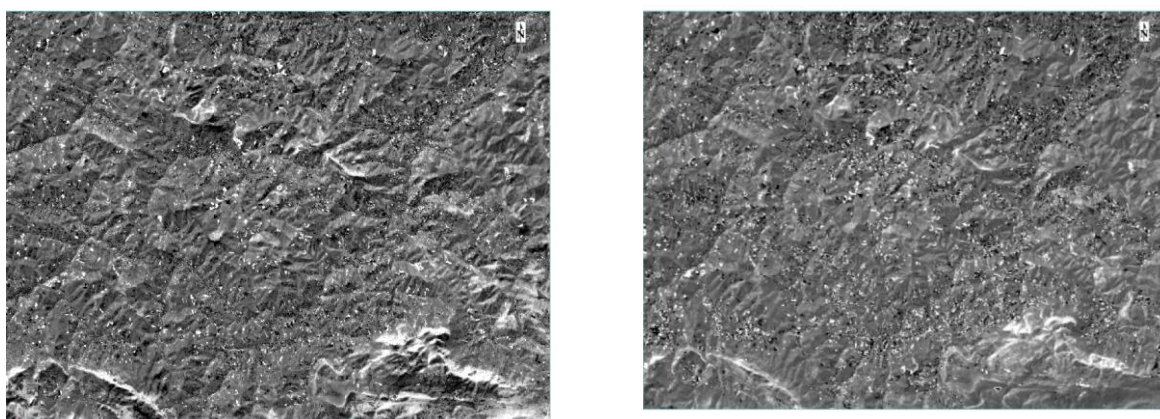


Figura 50 Imagen diferencia abril (izquierda) junio (derecha)



Figura 51: Imagen abril 16 pre-tala.(izquierda), junio 16 pre-tala (derecha).



Figura 52 : Imagen abril 17 post-tala(izquierda), junio 17 post-tala (derecha).

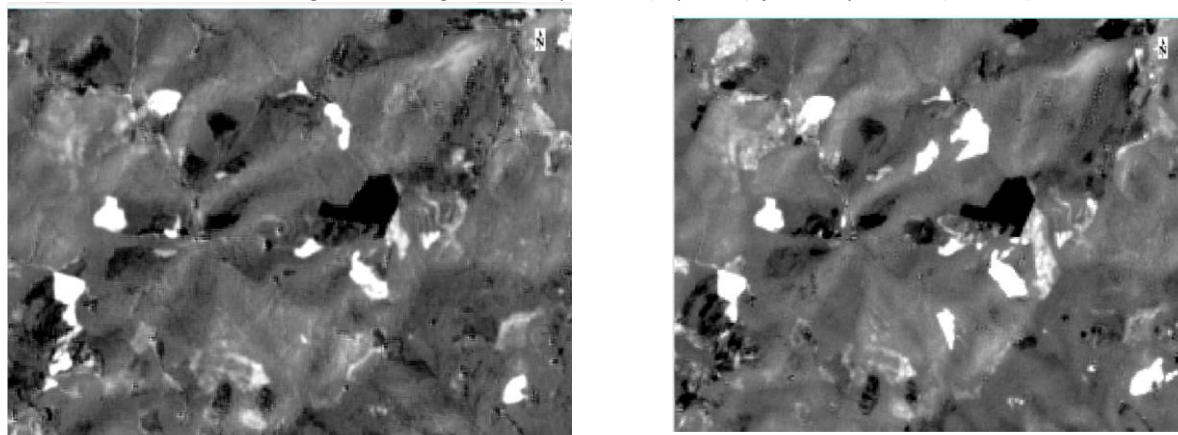


Figura 53 : Imagen detalle de diferencia abril (izquierda) junio (derecha)

En la Fig. 53 se observan en colores blancos y negros los cambios bruscos en las masas forestales. Apreciándose las talas de color blanco y las zonas en las que la vegetación está creciendo tras una tala de colores negros. En cuanto a las imágenes de abril y junio, se aprecia como en las composiciones multitemporales, que algunas talas estaban sin realizar en abril de 2017 y, lo que resulta más interesante, que se identifican como cambio variaciones en la fenología entre abril de 2016 y 2017. Por lo que parece más recomendable utilizar imágenes de junio para la detección de talas mediante el uso de imágenes diferencia.

Para el cálculo de las superficies de tala se utilizará por tanto, el histograma de la imagen diferencia de junio. Los cambios aparecerán en los valores límites del histograma lejos del cero, los valores máximos positivos serán los cambios en los que se ha perdido masa forestal (es decir se ha producido una tala) y los valores mínimos negativos del histograma serán los cambios en los que se ha ganado masa forestal (zonas en las que se está regenerando la vegetación). A la hora de fijar un umbral mínimo se aprecia que los resultados obtenidos varían significativamente, incluyendo más o menos ruido a la hora de delimitar las

zonas de cambio. Por lo que los errores de omisión o comisión que puedan surgir muy relacionados con el umbral que se establezca. Para comprobar esto en el caso del SWIR se adjunta un ejemplo de las diferentes pruebas realizadas para delimitar el umbral óptimo (en el resto de imágenes diferencia se adjuntará únicamente el valor estimado como umbral óptimo). A continuación se mostrarán las diferencias de las superficies de cambio obtenidas para los diferentes umbrales.

Hay que tener en cuenta a la hora de trabajar con los valores de reflectividad, de que el software de ENVI para trabajar con números enteros multiplica estos valores por 10.000 sacándolos de su escala habitual de 0 a 1.

Umbral 1:

Los valores del histograma que se va a enmascarar en la imagen diferencia SWIR serán todos los píxeles con valores superiores a 479,49 puesto que la pérdida de masa forestal está alrededor de estos valores máximos (Fig.54)

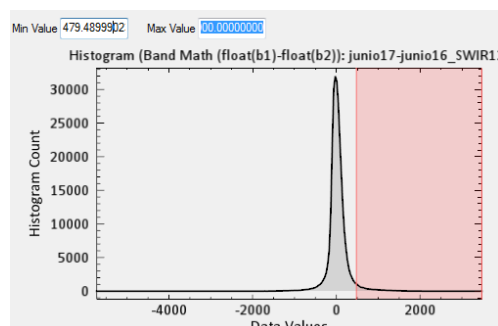


Figura 54: Histograma y umbral 1 de imagen diferencia SWIR

En la siguiente imagen se puede observar el resultado (Fig.55) en el que se muestra a la izquierda en color rojo los píxeles identificados como tala y a la derecha la imagen diferencia con el archivo shp de la base de datos por encima para poder comprobar como se han delimitado correctamente todas las zonas de cambios. En total se han recogido 562.060 píxeles lo que equivale a una superficie de 5620,6ha. En comparación con las 4945,26ha de tala que se recogen en la base de datos, con este umbral se estiman más superficies de tala.

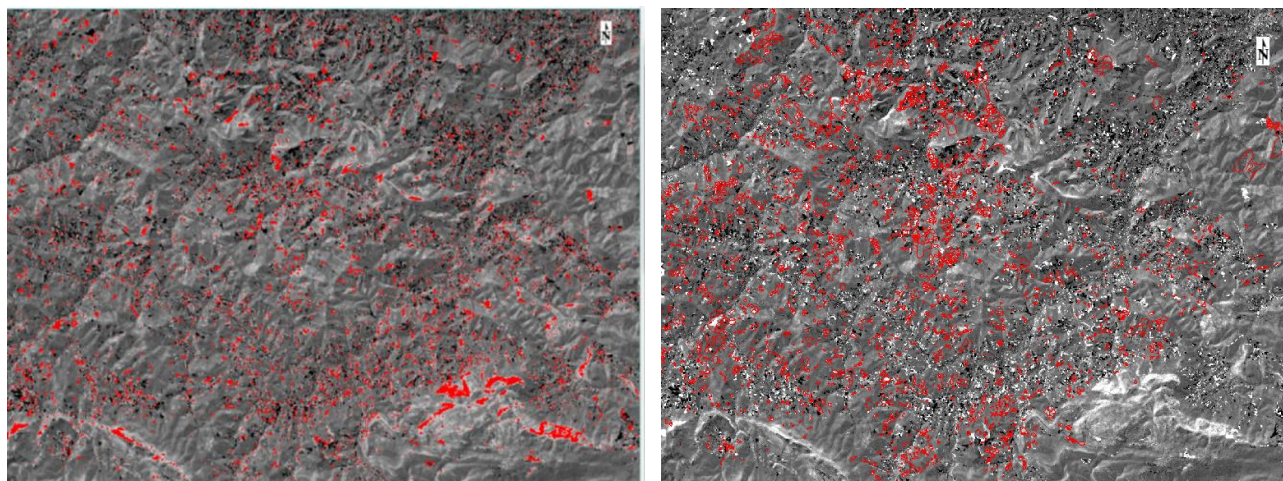


Figura 55: Imagen SWIR con los píxeles de cambio enmascarados (izquierda) & imagen de cambios original (derecha).

Se puede comprobar como todas las zonas quedan perfectamente enmascaradas en esta imagen con mayor nivel de detalle, aunque también se observa comparando los resultados con la base de datos que recoge pequeñas agrupaciones de píxeles pertenecientes a cambios no correspondientes a talas que se pueden considerar ruido.

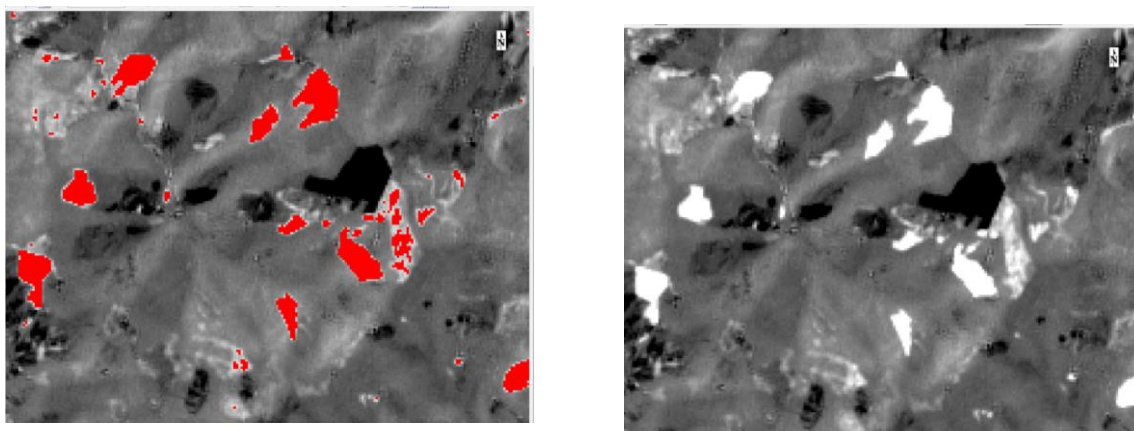


Figura 56: Imagen SWIR de detalle con los píxeles de cambio enmascarados (izq.) & imagen de cambios original (drch.).

Umbral 2:

Tras analizar los resultados del umbral 1 se ha intentado afinar la estimación subiendo un poco los valores mínimos de forma que coja menos cantidad de píxeles, tras realizar diversas pruebas se ha determinado que este valor mínimo sea de 587,72 (Fig.57). En total se han recogido 393.870 píxeles (valor menor que con el anterior umbral), equivalentes a 3938,7ha.

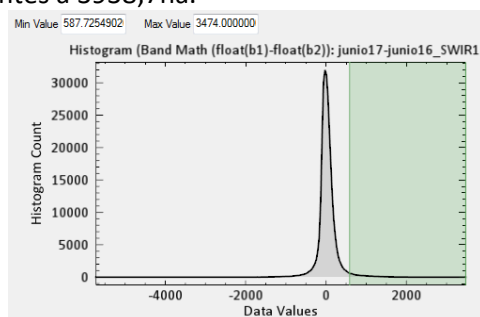


Figura 57: Histograma y umbral 2 de imagen diferencia SWIR

Así se han disminuido las áreas seleccionadas, disminuyendo el ruido, por lo que se demuestra que la elección de este umbral está directamente relacionado con los errores de comisión que puedan aparecer en la imagen. Los resultados generales son bastante buenos aunque se observan algunas zonas de diferencias altas entre imágenes en las que se ha producido un cambio brusco en el estado de la vegetación (fenología) de un año a otro y se detecta la diferencia confundiendo con las talas cuando no lo son. También en el caso de los prados o campos que han sido cortados tras la cosecha los confunde y se detectan como cambios, (esto se subsanará más adelante aplicando una máscara para solo analizar la masa forestal una vez de que se escoja la composición de diferencia de imágenes que mejores resultados de). Como ejemplo de esto, se puede apreciar en la siguiente figura 58 de un hayedo en el que el cambio de estado de la vegetación de un año a otro es confundido con un cambio brusco y se produce un error de comisión.



Figura 58: Imagen de junio16 (izquierda), junio17 (centro), imagen de cambio (derecha).

NIR

A continuación se muestra en la siguiente imagen los resultados obtenidos al restar las imágenes en las diferentes fechas para la banda del NIR y al lado la imagen antes obtenida con el SWIR para poder ver las diferencias entre ellas (Fig. 59). En la figura 60 se muestra una zona más detallada donde se pueden apreciar las zonas de cambio con mayor claridad. De nuevo aparecen en color blanco las zonas que han perdido masa forestal y en tonos negros las que lo han ganado.

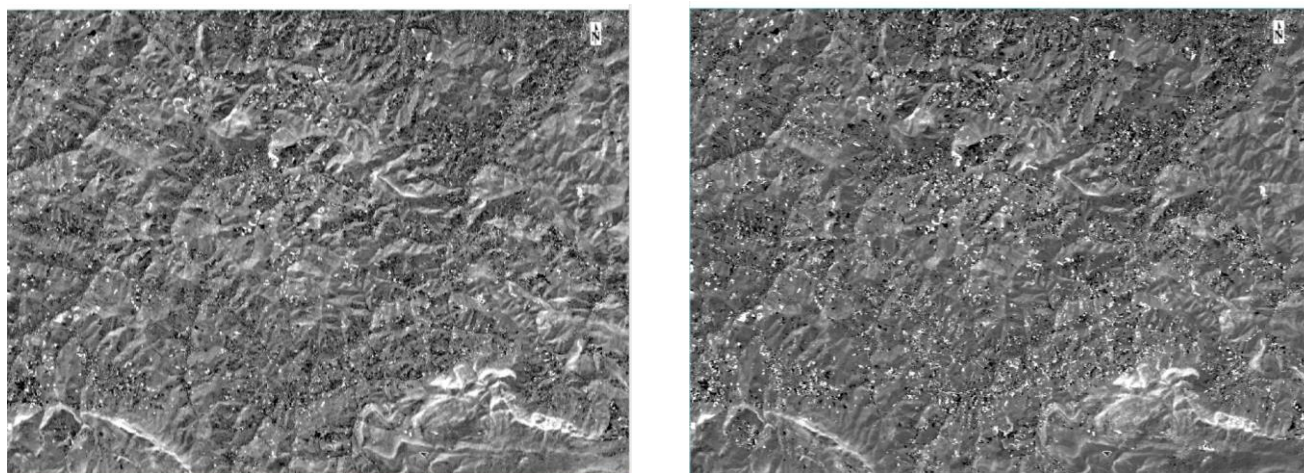


Figura 59: Imagen diferencia NIR (izquierda)/ Imagen diferencia SWIR (derecha).

Se observa como la imagen obtenida con las bandas del NIR detecta únicamente cambios más bruscos, delimitando de color blanco menos zonas que con las bandas del SWIR. En la siguiente imagen se ve como zonas que antes aparecían en blanco como cambio brusco ahora aparecen con un valor diferente más pequeño. Por lo que la banda del NIR reduce el ruido mejor, puesto que en el estudio de las talas solo interesa conocer las zonas de grandes cambios, sin tener en cuenta prados y cultivos.

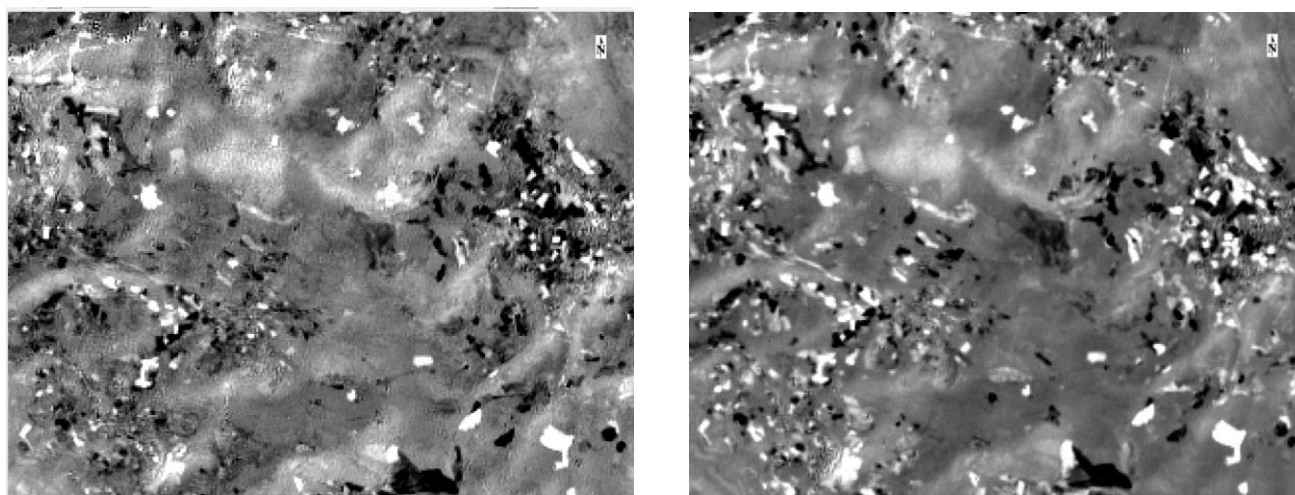


Figura 60: Imagen detalle diferencia NIR (izquierda)/ Imagen diferencia SWIR (derecha).

En este caso los valores de cambios son de nuevo los valores alejados del cero tanto en positivo como en negativo. Siendo los valores máximos positivos de colores blancos los cambios en los que se ha perdido masa forestal, y los valores extremos mínimos del histograma valores negativos cambios en los que se ha ganado masa forestal. 469,64 será el umbral de cambio establecido en este caso.

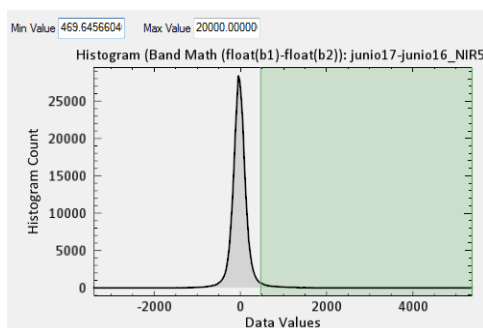


Figura 61 : Histograma y umbral de imagen diferencia NIR

En total se ha cogido una superficie de 324.836 píxeles equivalente a 3248,36ha, esta sería la imagen general de la zona de estudio en la que se observa menor cantidad de zonas en rojo detectadas como cambio que en la imagen del SWIR (Fig. 62).

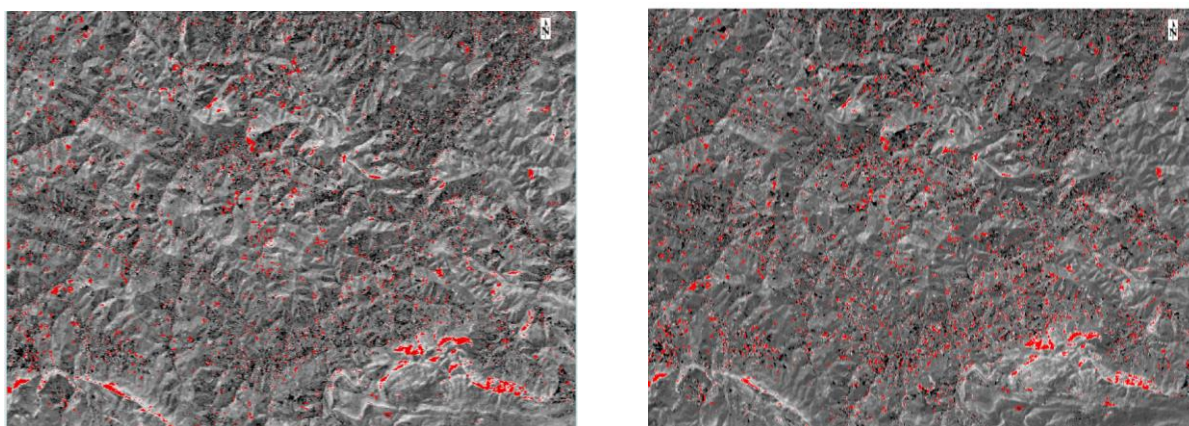


Figura 62 :Imagen diferencia NIR (Izq.), imagen diferencia SWIR (drcha.).

Se puede observar la zona más detalladamente para observar el ruido eliminado (Fig.63).

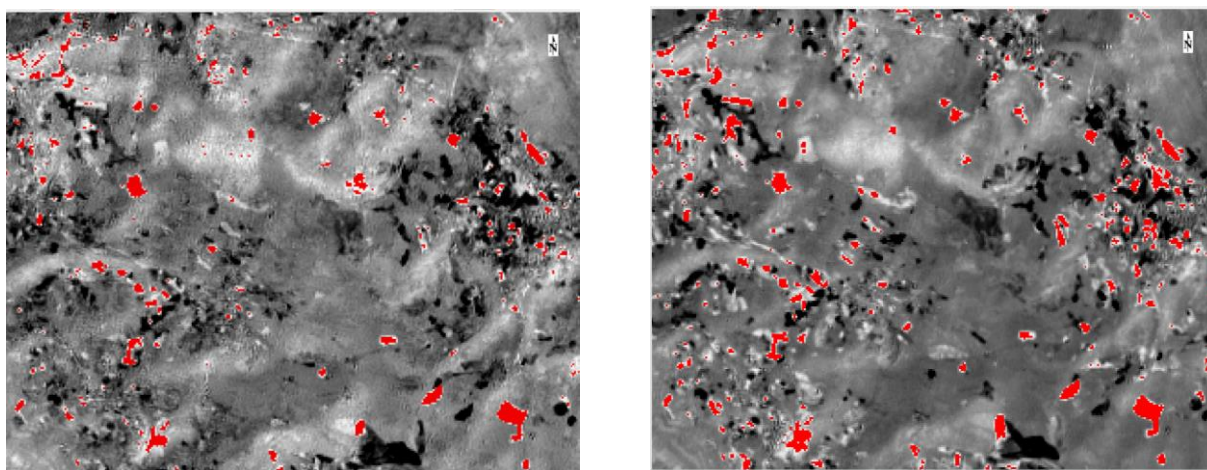


Figura 63 :Imagen detalle diferencia NIR (Izq.), imagen diferencia SWIR (drcha.).

Por lo que la a priori parece que diferencia entre bandas del NIR dará mejores resultados que la diferencia entre bandas del SWIR, evitando cometer más errores de comisión.

NDVI

La imagen resta de NDVI (Fig.64) es diferente a las obtenidas hasta ahora como se puede observar, aparentemente los cambios se ven más claros, puesto que se obtiene una imagen en tonos más grises donde en este caso las talas aparecerán de colores negros (pérdida de NDVI, al contrario de las imágenes analizadas hasta ahora donde las talas aparecían en blanco), y las zonas en las que se está reforestando el terreno tras una tala aparecerán en tonos blancos (lo que hasta ahora aparecía en tonos negros). Siendo los valores de pérdida de masa forestal ahora los valores mínimos del histograma con valores negativos. Esto se puede observar en la figura 65 con mayor detalle.

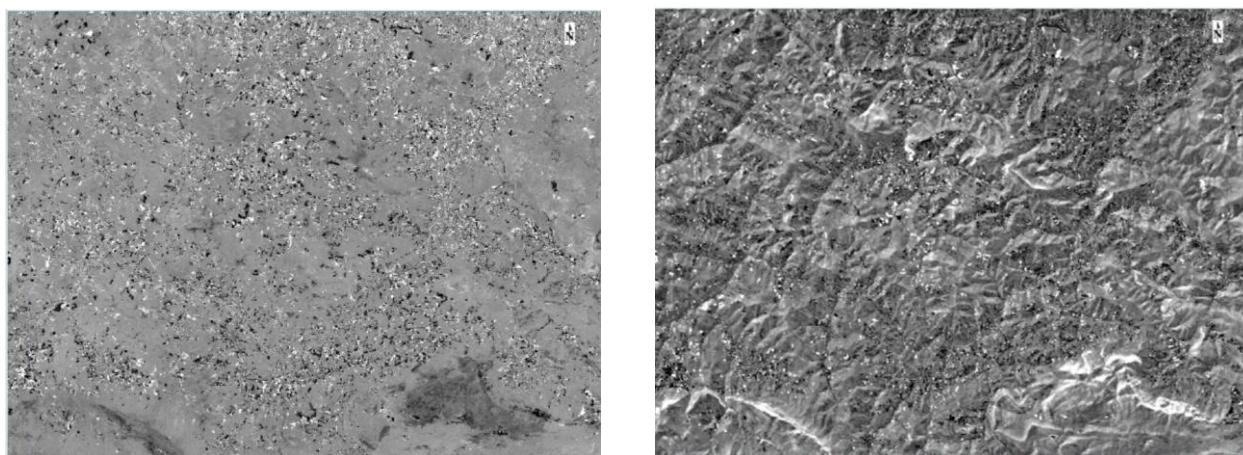


Figura 64: Imagen diferencia NDVI (lq.), imagen diferencia NIR (drcha.).

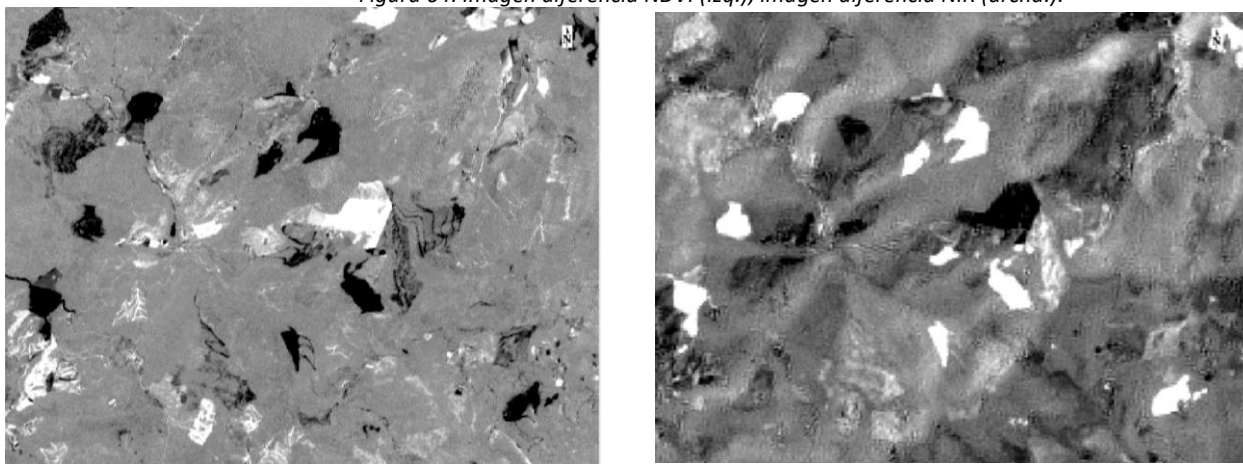


Figura 65 : Imagen detalle diferencia NDVI (lq.), imagen diferencia NIR (drcha.).

Como se puede apreciar en la figura 66 la imagen de diferencias con el NDVI obtiene delimitaciones de la zona de tala más claras que la imagen del NIR o del SWIR y detecta pequeñas talas con mayor resolución. Esto también es debido a que las bandas que se utilizan para el cálculo del NDVI tienen 10 metros de resolución a diferencia de las utilizadas con el NIR y el SWIR que tienen 20 metros. También se puede observar como al utilizar el NDVI desaparece el efecto topográfico, que aparece en la banda del NIR y del SWIR. En la siguiente imagen (Fig. 67) se observa el nivel de detalle al que llega el NDVI, observando a la izquierda la imagen de junio con la tala ya ejecutada.

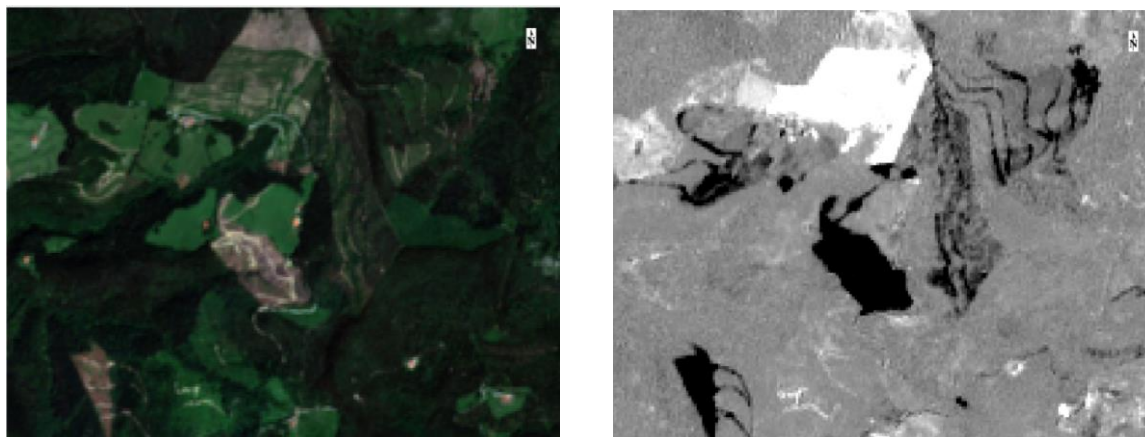


Figura 67 : Nivel de detalle de la imagen diferencia NDVI.

Se observa también que los bosques de frondosas que aparecían erróneamente indicados como talas debido a cambios en la fenología se identifican como leves cambios en la vegetación (tonos grises) en la imagen diferencia de NDVI (Fig.68), lo que constituye una mejora notable.

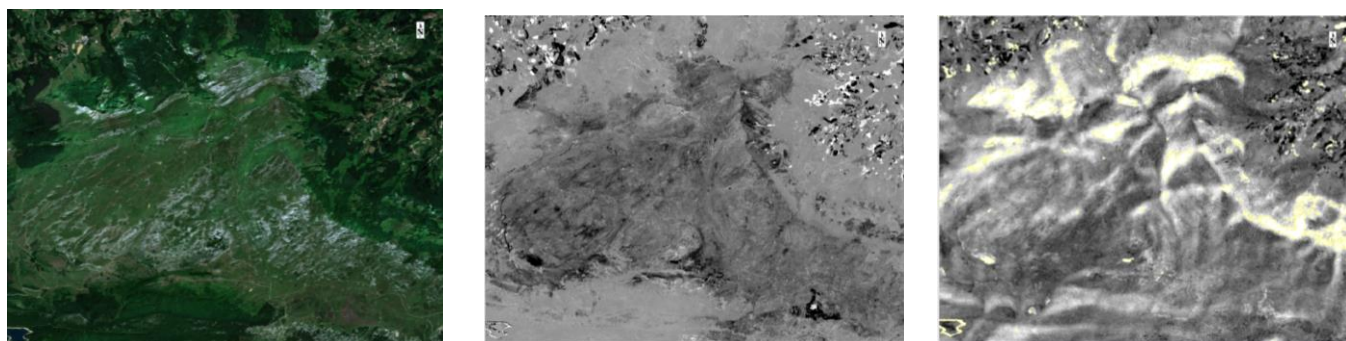


Figura 68 :Imagen original de Junio, imagen diferencia de NDVI e imagen diferencia de NIR.

Aún así también ocurre, como en las anteriores composiciones, que detecta los cambios en cultivos o prados produciendo errores de comisión, pero esto es subsanable aplicando una máscara para analizar solo las zonas de cubierta forestal como se realizará después a la hora de delimitar con exactitud la zona de estudio.

Al igual que antes se delimitarán las zonas de tala con los valores del histograma. Pero esta vez los valores que detectan el cambio de la pérdida de masa forestal estarán en los valores mínimos del histograma, al ser un índice normalizado entre -1 y 1 estos valores se encontrarán entre -1 y próximos al 0. Se determinará el umbral con -0,1763 como valor máximo para el NDVI.

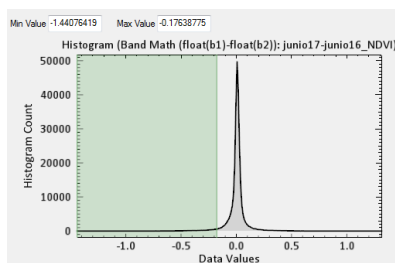


Figura 69: Histograma y umbral de imagen diferencia NDVI

En total se han identificado como tala 435.111 píxeles para la delimitación de las zonas, correspondientes a una superficie de 4351,11ha. Comprobando estos resultados con la base de datos de cortas de la que se

dispone, se ha comprobado que el número de errores de comisión también ha aumentado. Se pueden observar los resultados en la figura 70 , y comparar con los resultados de la imagen del NIR.

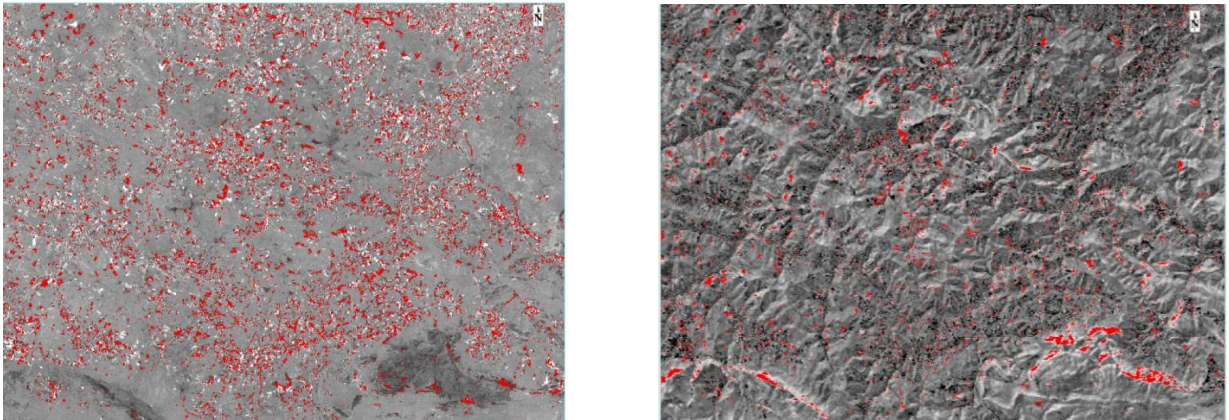


Figura 70 : Imagen NDVI con delimitación de cambios (izq.) & imagen NIR con la delimitación de cambios (dercha.).

RENDVI

Se compararán ahora los resultados obtenidos con la imagen diferencia de RENDVI de banda estrecha con los del NDVI (Fig.71). De nuevo la superficies en las que se ha perdido masa forestal aparecen de color negro y en las que esta masa ha aumentado de color blanco.

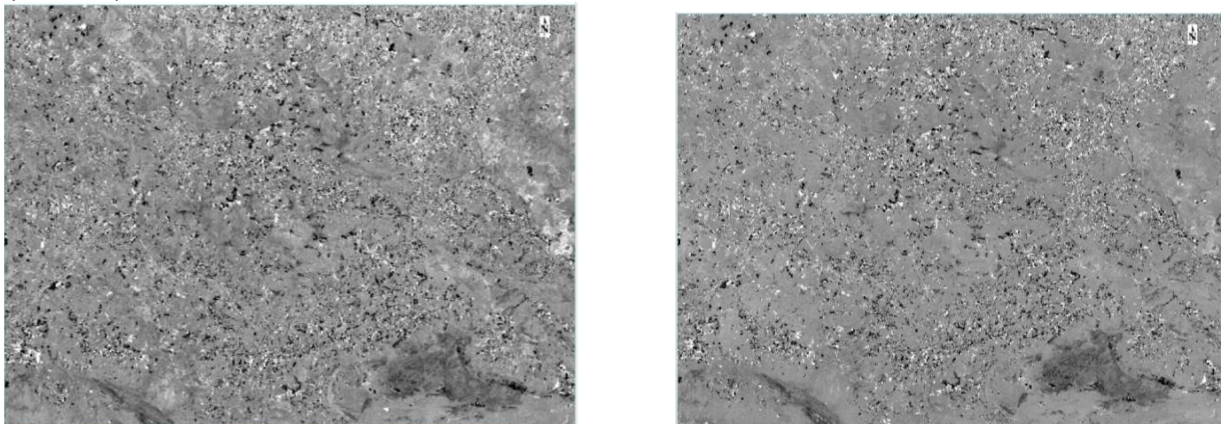


Figura71 : Imagen de cambios RENDVI (Izq.)& imagen de cambios NDVI (drcha.).

Los resultados visualmente son prácticamente idénticos, observando la imagen con mayor nivel de detalle se ve que la resolución espacial disminuye con este índice debido a que las bandas del Rededge son de 20 metros (Fig.72).

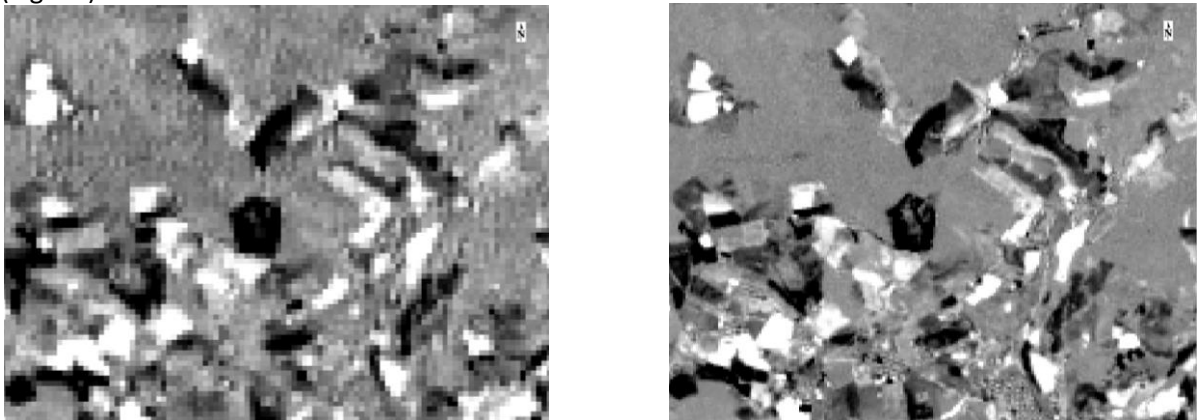


Figura 72 : Imagen detalle de cambios RENDVI (Izq.)& NDVI (drcha.).

En este caso con el mismo umbral se enmascaran como tala 353.525 píxeles, correspondientes a una superficie de 3535,25ha, lo que supone que con este índice se determina una superficie algo menor que con el NDVI.

NDII

Al hacer la diferencia entre las composiciones para las diferentes fechas se observan resultados visualmente muy parecidos a los obtenidos con el NDVI, pero las áreas de cambio que delimita el NDVI tienen menor resolución espacial como ocurre con el caso del RENDVI. Esto es debido a que la combinación de bandas utilizadas para el cálculo del NDII tiene una resolución de 20 metros. En la siguiente imagen (**Fig.73**) se observa la imagen de diferencias del NDII con el NDVI en la que de nuevo la pérdida de masa forestal aparece en colores negros y el aumento de esta en colores blancos.

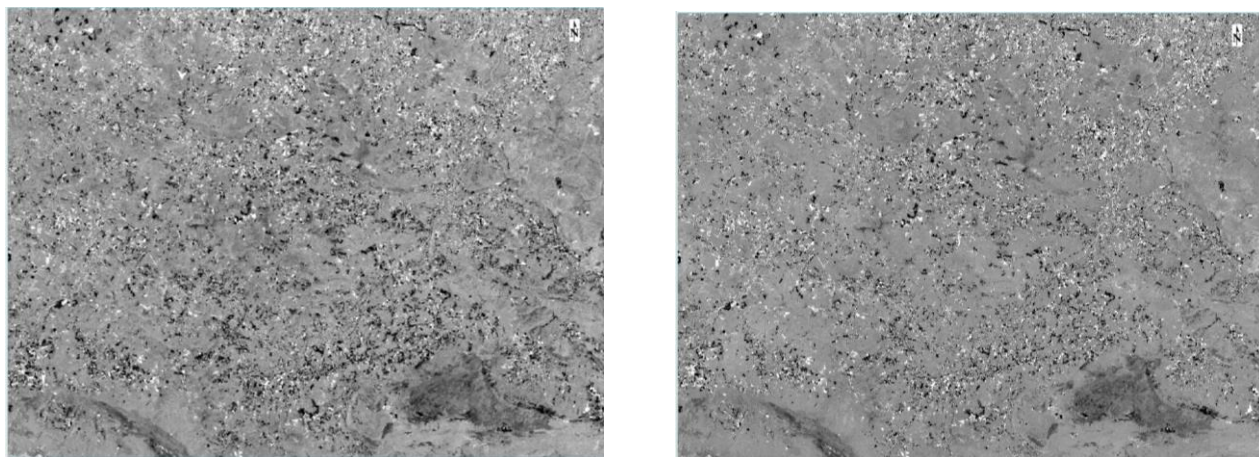


Figura 73 : Imagen de cambios NDII (lq.)& imagen de cambios NDVI (drcha.).

También se observa que al ser un índice que detecta mejor la humedad, detecta mayores cambios en las cubiertas que se están reforestando. Se puede observar en la siguiente imagen un ejemplo de ello. En cuanto a los perímetros de las talas detecta los cambios de la misma forma, aunque las cubiertas que han perdido masa forestal pero no son talas también las detecta con mayores intensidades, por lo que aumenta el ruido y los errores de comisión. Esto se puede observar con mayor detalle en la **figura 74**.

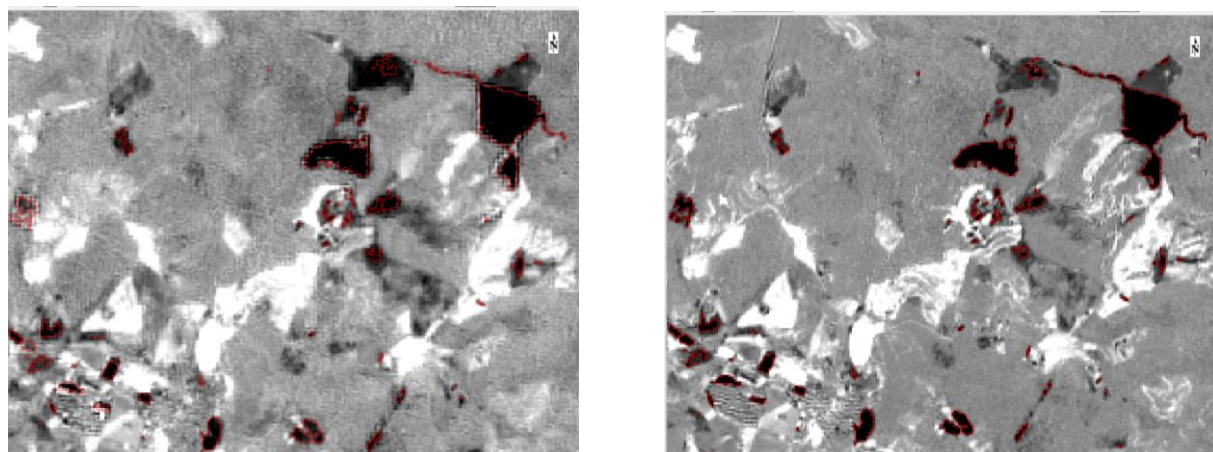


Figura 74: Imagen detalle de cambios NDII (lq.)& NDVI (drcha.).

En este caso los valores mínimos de la imagen van desde -1.308 a los máximos de 1.508, por lo que hay menos diferencia en los valores. El valor máximo asignado para establecer el filtro del umbral de cambio

ha sido de -0.2510 algo inferior al del NDVI que era de -0.1763. En total se han obtenido 313,031 píxeles equivalentes a una superficie de 31303,1m².

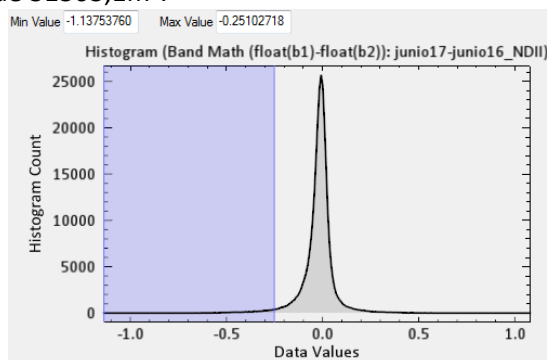


Figura 75 : Histograma y umbral de imagen diferencia NDII.

Como se puede observar en la imagen comparando el NDII con el NDVI (Fig. 76), se ha perdido superficie de tala, y se al comparar estos resultados con la base de datos se ha visto como han aumentado los errores de omisión.

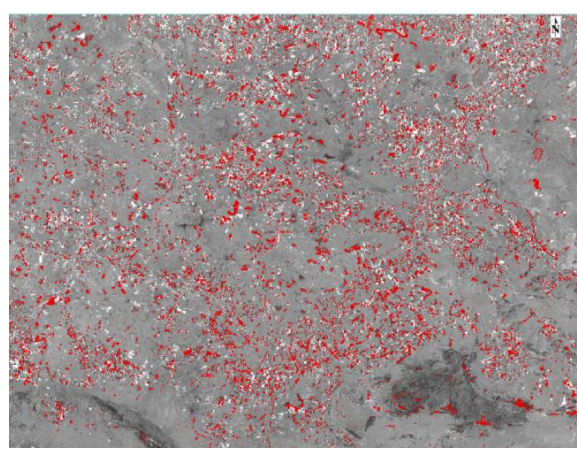
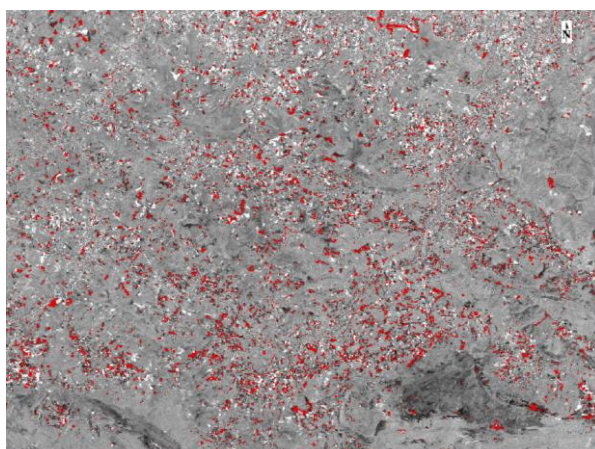


Figura 76 : Imagen NDII con delimitación de cambios (izq.) & imagen NDVI con la delimitación de cambios (dercha.).

SAVI

La imagen diferencia obtenida al utilizar este índice ha sido igual que la imagen diferencia obtenida con el NDVI visualmente aunque los valores de las estadísticas como se puede observar más abajo son diferentes. Estableciendo el umbral en un máximo de -0.22 se han detectado con el SAVI 433.795 píxeles (una cantidad de píxeles muy parecida que con el NDVI 435.110). En total se recoge una superficie de 43379500 m².

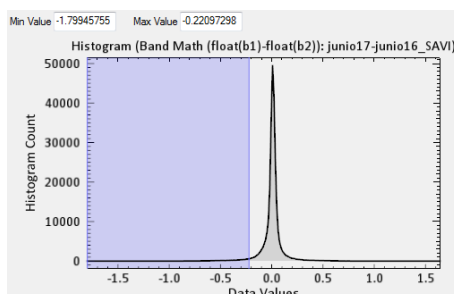


Figura 77 : Histograma y umbral de imagen diferencia SAVI

En la siguiente imagen se puede observar la imagen de cambios obtenida para el SAVI y la imagen con las áreas determinadas como cambio tras aplicar el umbral establecido (Fig.78).

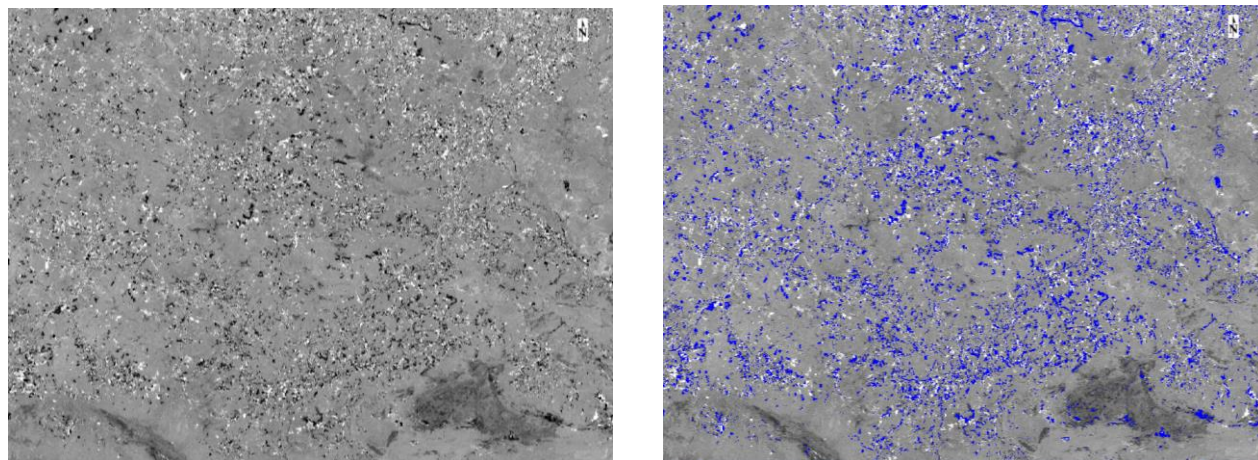


Figura 78: Imagen de cambio SAVI.

El resumen de los resultados obtenidos con estos análisis se puede ver más adelante en una tabla donde se muestran las bandas he IV utilizados, junto con los umbrales fijados y la superficie de tala para cada caso. Haciendo ahí un análisis más profundo de los datos resultados. (Apartado 5.3.1)

5.1.4 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

-Cálculo de histogramas:

Este sería el gráfico (Fig.79) con los valores de las 20 CP en el que se ve gráficamente qué cantidad de información recoge cada CP. Se ve que las primeras 3 CP son las que más información recogen, a partir de la 6 CP la cantidad de información que recogen las componentes es muy pobre.

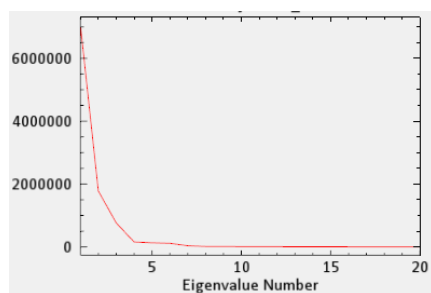


Figura 79 : Histograma de CP.

En la siguiente imagen (Fig.80) se observa el histograma de las primeras 6 CP, se ve como cada vez en más estrecho el histograma debido a que va perdiendo información cada CP comparándolo con la anterior. Si se observa la correlación entre bandas ahora es nula, todas las bandas entre ellas tienen una correlación de 0.

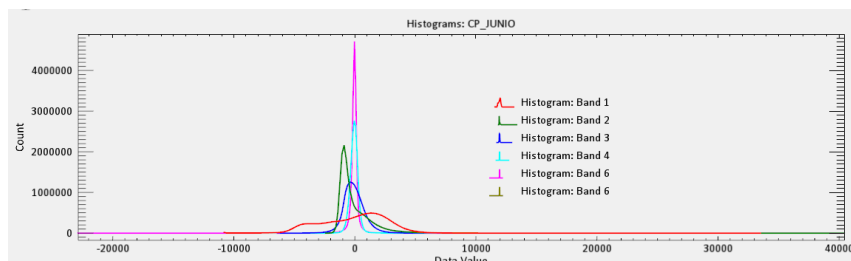


Figura 80: Histograma de las 6 primeras CP.

-Tabla de Autovalores:

Después a partir de la matriz de covarianza calculada se procederá al cálculo de los autovalores, la suma total de estos indica el 100% de la variabilidad de la información de la imagen que está recogida en cada CP. Estos autovalores multiplicados por el ND de cada pixel en las bandas originales permiten calcular el ND de cada pixel en cada CP.

Se analizarán los autovalores o eigenvalues para calcular el porcentaje de varianza de cada CP, ya que estos indican la ponderación que se aplica al ND de cada una de las bandas para la obtención de cada CP. De la interpretación de estos se puede conocer en que CP pueden estar las zonas de cambio.

Tabla 5 : Autovalores en el ACP.

CP	autovalores	% Varianza
Num 1	7040685,32025100	69,688939294
Num 2	1778434,98292300	17,603009072
Num 3	763298,10709500	7,555150249
Num 4	156890,44456700	1,552906879
Num 5	129515,60956700	1,281949845
Num 6	115075,26032700	1,139018784
Num 7	37435,834877	0,370541148
Num 8	14468,410946	0,143208817
Num 9	13881,978946	0,137404293
Num 10	10186,872117	0,100830002
Num 11	9532,969729	0,094357654
Num 12	7377,344691	0,073021205
Num 13	6548,455714	0,064816834
Num 14	6415,798985	0,063503793
Num 15	5444,845311	0,053893261
Num 16	2711,146890	0,026835023
Num 17	2292,733002	0,022693548
Num 18	1246,455158	0,012337455
Num 19	865,946540	0,008571168
Num 20	708,390921	0,007011677
suma	10103016,90855700	

Se puede observar cómo en las primeras componentes se encuentra la mayoría de información. Acumulando el 98.92% de la varianza total de las dos imágenes se reparte entre las 6 primeras componentes. La primera componente será la que más información presente con un 69,68% seguida de la segunda en la que la cantidad de información ya disminuye notablemente con un 17,60%. A partir de ahí el porcentaje de información de cada componente está por debajo del 0.4%.

-Tabla de Autovectores:

Si se analizan los autovectores o eigenvectores de cada componente principal, se ve como en cada componente se le da más peso a unas bandas que ha otras así en la primera componente principal el mayor peso lo tienen las bandas 6,7 8 y 16,17 y 18. Y para la segunda C.P las bandas 9, 10, 19 y 20 serán la que más información aporten. Se observa que a medida que se obtienen más componentes principales se

incorpora menos información de cada banda. En la siguiente tabla 6 se pueden observar de amarillo los cambios en los símbolos de las bandas para las diferentes fechas y de rojo las bandas con símbolo negativo para las 6 primeras CP.

Tabla 6: Autovectores en el ACP.

	azul	verde	rojo	nir5	nir6	nir7	nir8	nir8A	swir11	swir12	azul	verde	rojo	nir5	nir6	nir7	nir8	nir8A	swir11	swir12
Eigenvector	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9	Band 10	Band 11	Band 12	Band 13	Band 14	Band 15	Band 16	Band 17	Band 18	Band 19	Band 20
Band 1	-0.001770	0.029689	-0.005408	0.063411	0.289613	0.353541	0.376836	0.366157	0.114133	0.032888	-0.001436	0.026954	-0.006442	0.056775	0.283002	0.349928	0.373634	0.365983	0.121546	0.034078
Band 2	0.212616	0.248661	0.288136	0.305249	0.096133	0.015734	0.011782	0.021984	0.322564	0.313617	0.202050	0.232451	0.283459	0.278426	-0.036903	-0.155658	-0.163982	-0.154931	0.285252	0.306050
Band 3	0.068053	0.038712	0.096535	0.012839	-0.279284	-0.358527	-0.377863	-0.372688	-0.004215	0.064818	0.077974	0.088451	0.065653	0.093535	0.290094	0.348199	0.347387	0.338209	0.130976	0.085858
Band 4	0.305762	0.285678	0.229878	0.033997	-0.016027	-0.036589	0.298305	-0.111803	-0.322955	-0.156484	0.268556	0.248307	0.186402	-0.012115	-0.041457	-0.052324	0.308049	-0.131480	-0.444443	-0.237048
Band 5	0.161276	0.112696	0.131669	0.076632	0.210554	0.228279	-0.497669	0.188308	-0.122785	-0.091399	0.108105	0.058210	0.055239	0.000431	0.206822	0.245448	-0.514540	0.198145	-0.265737	-0.198235
Band 6	0.087990	0.119292	0.220555	0.252485	-0.037181	-0.095783	-0.009945	-0.020319	0.494717	0.373235	-0.215446	-0.224292	-0.289517	-0.259284	-0.036868	0.034679	0.103439	0.002330	-0.364466	-0.276841
Band 7	0.207873	-0.027362	0.186445	-0.404808	-0.335743	0.165012	-0.019250	0.197898	0.083679	0.111983	0.196860	-0.057716	0.218529	-0.431881	-0.433538	0.155969	-0.023386	0.211406	0.092652	0.126152
Band 8	-0.071715	-0.228203	0.104069	-0.082916	0.197985	0.304992	-0.118714	-0.234653	-0.265396	0.412727	-0.076264	-0.203778	0.142495	-0.003058	0.051382	0.188193	0.147721	-0.303341	-0.307826	0.410630
Band 9	-0.080974	-0.090258	-0.082871	-0.074268	-0.144525	-0.218242	0.571062	-0.239077	0.045872	0.173223	0.063159	0.027690	0.128619	-0.005940	0.212073	0.303987	-0.539279	0.113031	-0.160734	0.029447
Band 10	-0.211570	-0.263712	-0.327279	-0.212822	-0.063733	-0.054884	-0.175619	0.249600	0.381951	0.146130	0.311533	0.333799	0.236952	0.069037	0.157657	-0.068671	0.155774	-0.176858	-0.302737	-0.140286
Band 11	0.233960	0.218906	-0.113209	-0.398994	0.377088	-0.001385	-0.013811	-0.267306	0.160239	-0.021747	0.124517	0.116510	-0.218096	-0.420312	0.307973	0.014206	-0.018620	-0.274120	0.247967	-0.002927
Band 12	0.293651	0.126750	-0.516649	0.108351	-0.121970	0.104619	-0.011699	-0.007189	-0.141239	0.271348	0.271137	0.105499	-0.496974	0.120872	-0.162101	-0.057922	-0.023511	0.197092	-0.152026	0.247122
Band 13	-0.000854	-0.015258	0.168458	-0.186915	-0.122187	0.126694	0.031868	-0.017288	-0.088113	0.163622	-0.070734	-0.042675	0.049685	-0.089680	0.444462	-0.692985	-0.026043	0.394887	-0.098025	0.091028
Band 14	-0.157422	-0.070728	-0.099218	0.017984	0.277602	0.340405	-0.012792	-0.595975	0.225747	-0.052578	0.067790	0.107645	0.156313	0.063491	-0.353097	-0.098943	0.013275	0.361056	-0.017063	-0.219297
Band 15	0.034246	0.043260	0.031053	0.016851	-0.583626	0.601042	0.024136	-0.175089	0.121223	-0.110910	-0.052376	0.047045	-0.125785	0.150844	0.228775	0.093727	-0.027095	-0.293127	0.117825	-0.174375
Band 16	-0.386809	0.458529	0.081978	-0.280604	-0.032531	0.014653	-0.038896	0.060705	-0.076636	0.161298	-0.428358	0.515816	-0.118411	0.055211	-0.146956	0.090828	-0.030190	0.040968	-0.093823	0.091900
Band 17	0.302370	-0.087428	0.192852	-0.558400	0.109537	-0.089755	0.032229	0.018913	0.147325	0.004518	-0.073425	-0.194157	-0.175677	0.639151	-0.091040	0.018870	-0.010464	0.018390	-0.071063	-0.110201
Band 18	-0.251600	-0.333658	0.401881	0.020216	0.052581	-0.013709	0.033745	0.020932	-0.259728	0.309627	0.364580	0.222254	-0.397626	-0.016013	-0.043660	0.004436	-0.025675	-0.020856	0.248419	-0.300310
Band 19	-0.096551	-0.212285	0.321602	0.049369	0.004198	0.005712	0.028445	-0.048412	0.277868	-0.500189	0.133330	0.190632	-0.332889	-0.061240	-0.001437	0.006442	-0.025800	0.038677	-0.280483	0.509497
Band 20	0.492594	-0.501350	-0.038154	0.102135	0.022747	-0.009357	0.017615	-0.004893	-0.045455	0.044009	-0.486125	0.484966	0.043072	-0.100655	-0.025230	0.000031	-0.013981	0.013990	0.047732	-0.048653

La CP1: explica el 69.68% de la varianza total de las dos imágenes. Eigenvector con igual signo entre bandas y fechas, siendo todos los coeficientes positivos excepto los de las bandas del azul y el rojo que son negativos.

El CP2: explica el 17.60% de la varianza total de las dos imágenes. Eigenvector con símbolo diferente entre las bandas y fechas del NIR 6, 7 y 8 al presentar símbolo negativo para la segunda fecha.

El CP3: explica el 7.55% de la varianza total de las dos imágenes. Eigenvector con símbolo diferente entre las bandas y fechas del NIR 6, 7 y 8 al presentar símbolo negativo para la primera fecha.

El CP4: Explica el 1.55% de la varianza total de las dos imágenes. Eigenvector con símbolo diferente entre la banda del Rededge 5 al presentar símbolo positivo para la primera fecha y negativo para la segunda.

El CP5: Explica el 1.28% de la varianza total de las dos imágenes. Presentando los mismo símbolos para las dos fechas. Siendo positivas para todas las bandas excepto el NIR 8 y SWIR 11 y 12.

El CP6: Explica el 1.13% de la varianza total de las dos imágenes. Presentando símbolo contrario en todas las bandas entre las diferentes fechas excepto en la de banda 6 del Rededge. Presentan valores positivos para la primera fecha salvo en las bandas del Rededge 6, 7 y 8 y en la segunda fecha sucede lo contrario todas tendrán símbolo negativo salvo 7 y 8. Por lo que esta será la banda que más cambios presente. La banda 6 del NIR estará relacionada con la pérdida de vigor vegetal en las zonas forestales.

A partir de la componente 6 el resto de componentes explican un porcentaje de varianza inferior al 0.4%, por lo que no serán analizadas. Por lo tanto es la CP6 la componente en la que se encuentran los cambios y será por tanto esta la CP que se utilizará para el análisis.

- Análisis visual de las CP:

A continuación se representan las diferentes imágenes de las 6 primeras CP (componentes de mayor importancia), para una zona en la que se han producido talas para observar la información que aporta cada CP. De rojo estarán marcados los polígonos calculados previamente mediante diferencia entre imágenes donde se han producido talas.

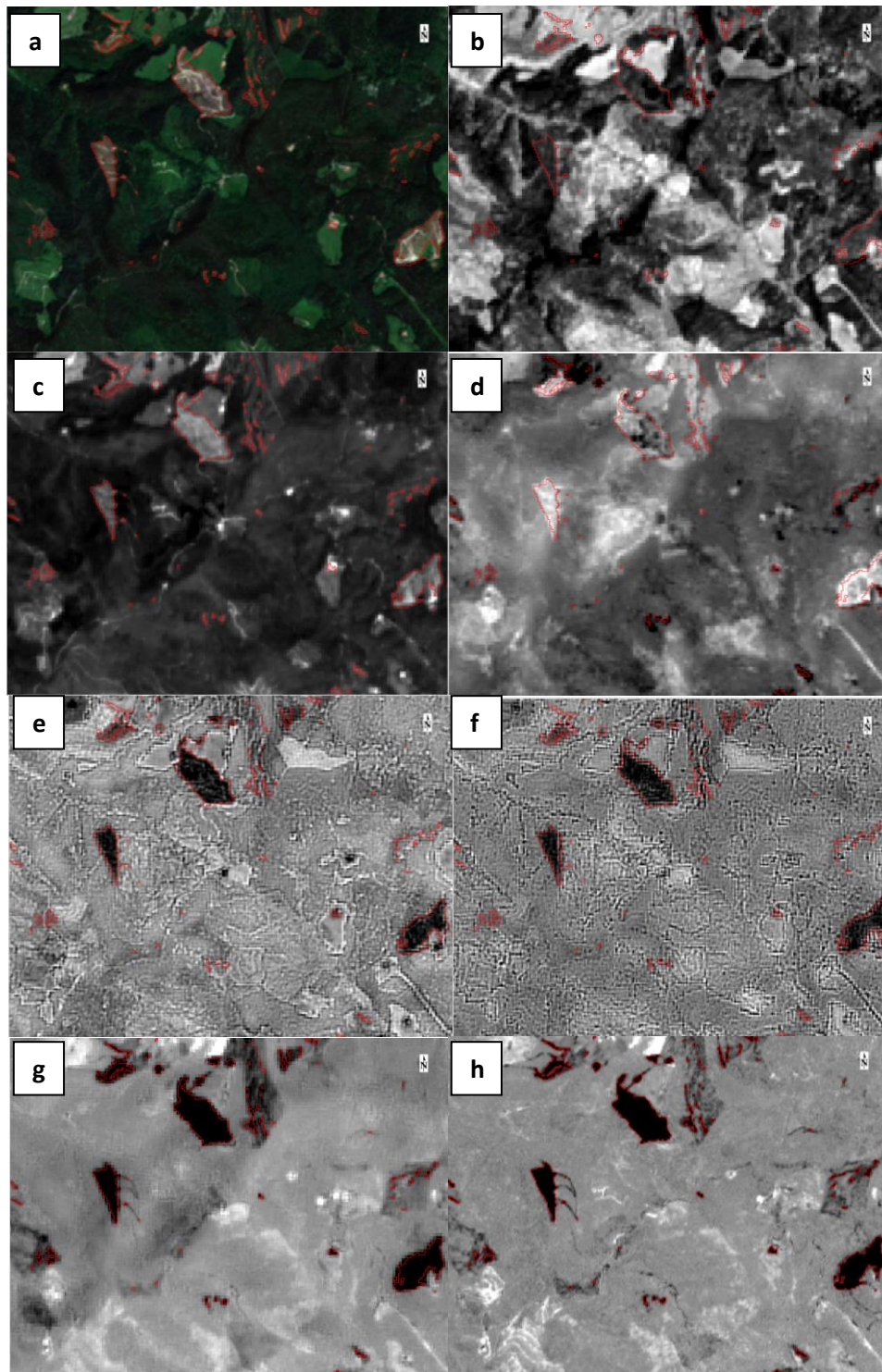


Figura 81:Imagen de CP de talas, a)CP1, b)CP2,c) CP3,d) CP4, e) CP5, f) CP6, g) imagen diferencia NDVI

Se puede observar como la detección de cambios mediante la CP6 da unos resultados muy similares a los de la imagen diferencia del NDVI. Presentando una menor resolución espacial con el NDVI.

-Detección de cambios:

Analizando el histograma de la CP6, se observa que presenta también un perfil gaussiano con la mayoría de los píxeles alrededor del 0 como ocurre con las imágenes diferencia. Los cambios aparecerán en los valores límites del histograma lejos del cero, los valores máximos positivos de colores blancos serán los cambios en los que se ha ganado masa forestal, y los valores extremos mínimos del histograma valores negativos serán los cambios en los que se ha perdido masa forestal. Se procederá a enmascarar los píxeles de cambio de la CP6, como se ha hecho hasta ahora para delimitar las áreas en las que se ha producido pérdida de vigor vegetal poniendo -824,42 como valor máximo en el histograma. En total se han recogido 352.026 píxeles, correspondientes a una superficie de 3520,26 ha. Obteniendo unos resultados muy similares a los de la imagen de diferencias con el RENDVI con los que se conseguían 3535,25ha de superficie.

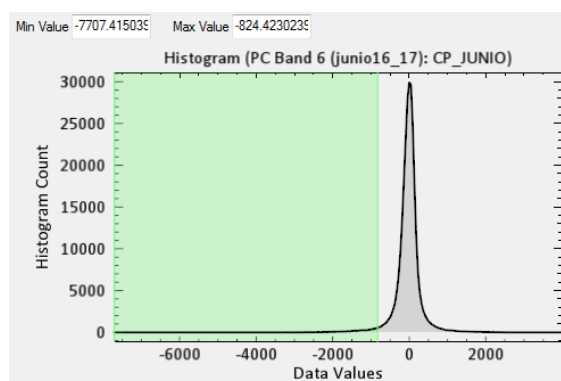


Figura 82 : Histograma y umbral de imagen ACP

Esta sería la imagen general de todos los polígonos detectados para la imagen de CP6 y a la derecha la imagen obtenida con el NDVI y sus polígonos de detección de cambios.

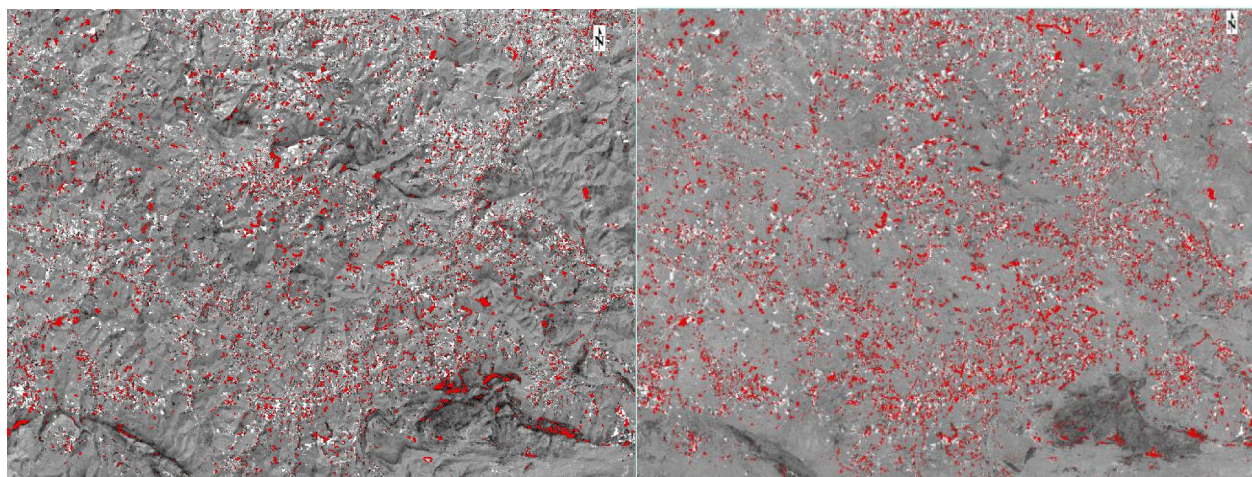


Figura 83 : Imagen con polígonos tras aplicar el umbral en CP6 (izq.) & polígonos en NDVI.

Haciendo un análisis más exhaustivo de la imagen de cambios, se ha observado que con la CP 6 se detectan además otro tipos de cambios como son los de las canteras que no son propios para el estudio de talas de este trabajo ya que únicamente interesan los cambios en las masas forestales (Fig. 85).

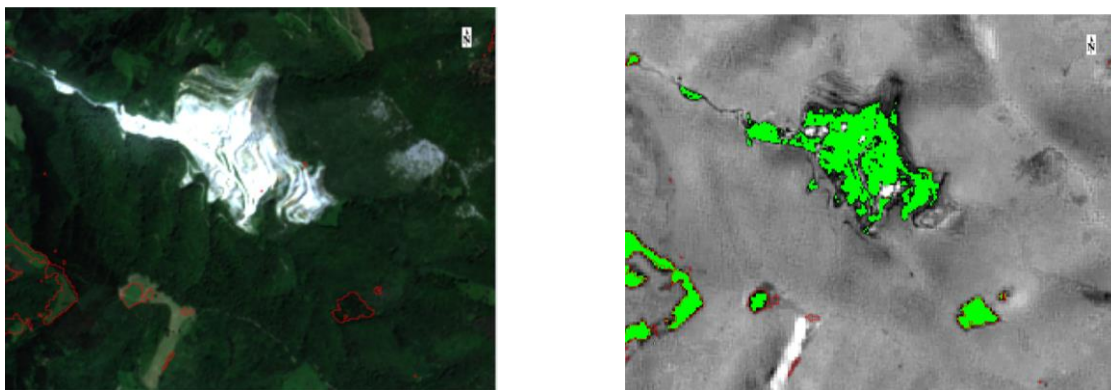


Figura 85: Detalle de la detección de cambios en canteras

-Correlación:

En la siguiente tabla 7 se muestra la correlación entre la imagen de cambios obtenida por el método de ACP y las imágenes diferencia calculadas, este valor nos dará la relación entre los distintos índices de vegetación y los diferentes métodos utilizados.

Tabla 7 : Correlaciones entre imágenes diferencia y CP6.

	SWIR ABRIL	SWIR JUNIO	NIR 5	NDVI	RENDVI	NDII	SAVI	CP6
CP6	-0.427053	-0.945961	-0.841200	0.765619	0.757277	0.715980	0.765705	1.000000

La correlación con el CP6 es menor que entre los índices pero esto es normal ya que el método utilizado para su obtención es muy diferente siendo el NDII el IV que menor correlación muestra con la CP6 dentro de los IV con un valor de 0,71, el NDVI y el SAVI presentan las correlaciones más altas con valores en torno a los 0,76. Se observa también como las bandas del NIR y del SWIR que con los IV no muestran ningún tipo de correlación con la CP6 tampoco la tienen dando aún peores resultados que para los IV.

5.2 ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES DIFERENCIA

A continuación se realizará el estudio exhaustivo de los resultados obtenidos después de aplicar la metodología de la diferencia entre imágenes multitemporales.

-Umbral y superficie de cambio:

En la siguiente tabla 8 se muestran los resultados obtenidos con cada imagen diferencia, el umbral de cambio establecido en cada caso y los píxeles detectados como cambio con cada método con su equivalente superficie.

Tabla 8 : Resultados de imágenes diferencia.

	umbral	píxeles	Superficie ha
SWIR	max.587,72	393.870	3938,70
NIR	max. 469,64	324.836	3248,36
NDVI	min.- 0,1763	435.110	4351,10
RENDVI	min.-0,1763	353.525	3535,25
NDII	min. -0,2510	313.031	3130,31
SAVI	min.-0,22	433.795	4337,95

-Cálculo de histogramas

En cuanto a la distribución de los histogramas obtenidos en las distintas imágenes diferencia calculadas, se puede decir que todos presentan una distribución normal con perfil gaussiano con valores máximos en torno al 0.

Ahora se superpondrán entre ellos para analizar mejor las diferencias, en la véase en la figura 86 la superposición de los histogramas de la diferencias entre bandas del NIR y del SWIR.

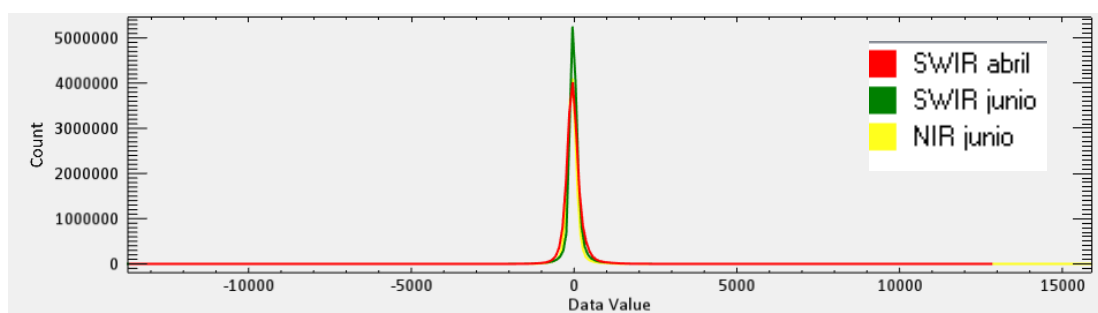


Figura 86: Superposición de los histogramas de diferencia entre bandas.

Los cambios aparecerán en los valores límites del histograma lejos del cero, los valores máximos positivos que aparecían de colores blancos en las imágenes, serán los cambios en los que se ha perdido masa forestal y los valores extremos mínimos del histograma valores negativos serán cubiertas ya taladas en las que se está regenerando la vegetación..

Como se observan, los histogramas de están bandas presentan un perfil gaussiano muy parecido, siendo su rango alrededor de 0 muy similar también en todos los casos. El NIR y el SWIR de abril son prácticamente iguales, siendo los valores del SWIR en junio los que presentan mayor cantidad de píxeles en torno al 0. De los tres se podría decir que el SWIR en abril tiene mayor rango de valores alejados del 0.

A continuación se muestra la superposición de los histogramas de las imágenes diferencia de los diferentes IV (Fig. 87).

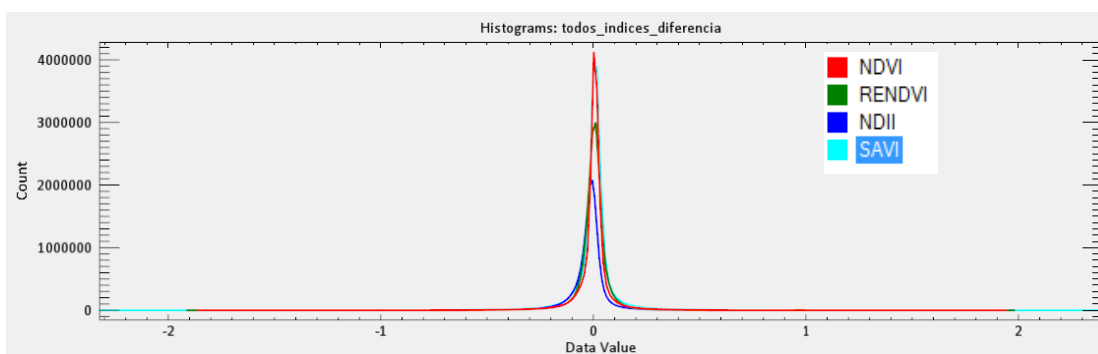


Figura 87 : Superposición de los histogramas de diferencia entre IV.

Los cambios aparecerán en los valores límites del histograma lejos del cero, ahora al contrario que en la diferencia entre bandas los valores mínimos negativos que aparecían de colores negros en las imágenes, serán los cambios en los que se ha producido una tala. Los valores extremos máximos del histograma valores positivos serán los cambios en los que se ha ganado masa forestal.

Observando los histogramas se ve de nuevo como el rango de estos es muy parecido de nuevo, el SAVI y el NDVI presentan histogramas prácticamente iguales con mayor cantidad de píxeles en torno al 0, después el RENDVI y por último el NDII.

-Tablas de estadísticas:

En la siguiente tabla se puede observar la comparación de los valores generales en la composición de diferencias entre las diferentes bandas del NIR y del SWIR.

Tabla 9: Estadísticas de las imágenes diferencia entre bandas.

Basic Stats	Min	Max	Mean	StdDev
SWIR ABRIL	-13629	12819	25,455733	266,400995
SWIR JUNIO	-13711	10316	47,107982	233,121075
NIR	-4550	15976	-14,070202	206,378828

Como se observa en la tabla 9, los valores del SWIR entre el mes de abril y junio varían, siendo estos mayores en los valores mínimos para junio y en cambio en los valores máximos mayores en abril. Si se comparan con los valores del NIR se observa como los valores mínimos en esta banda disminuyen y los valores máximos aumentan por lo que se ven grandes diferencias comparando con la banda del SWIR.

En la siguiente tabla se puede observar la comparación de los valores generales en la composición de diferencias entre los diferentes Índices de vegetación calculados.

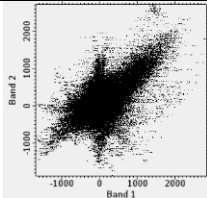
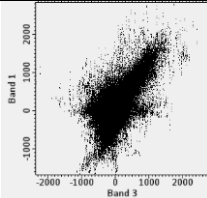
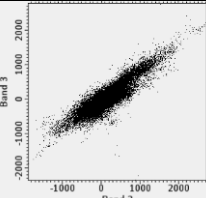
Tabla 10 : Estadísticas de las imágenes diferencia IV.

dif. IV	Min	Max	Mean	StdDev	Rango
NDVI	-1,859364	1,937645	0,009404	0,087078	3,797009
NDII	-1,308617	1,508653	-0,016316	0,083685	2,817270
RENDVI	-1,910599	1,978788	0,008568	0,077248	3,889387
SAVI	-2,322963	2,412698	0,011759	0,108830	4,735661

Como se observa en la tabla 10, los valores máximos se obtienen con el SAVI seguidos del RENDVI y del NDVI siendo el NDII el que obtiene menores valores entre los valores máximos, si se observan los valores mínimos ocurre exactamente lo mismo. El índice que tiene mayores diferencias entre los valores máximos y mínimos es el SAVI, seguido después del RENDVI y el NDVI siendo de nuevo el NDII el que presenta menores diferencias entre los valores máximos y mínimos.

-Correlación entre imágenes diferencia:

Se estudiará la correlación con todos los índices de vegetación calculados. Se mostrarán las correlaciones gráficamente mediante los scatterplots y mediante una tabla.

GRÁFICOS DE CORRELACIONES		
SWIR abril-SWIR junio	SWIR abril- NIR junio	SWIR junio- NIR junio
		
NDVI-RENDVI	NDVI-NDII	NDVI-SAVI

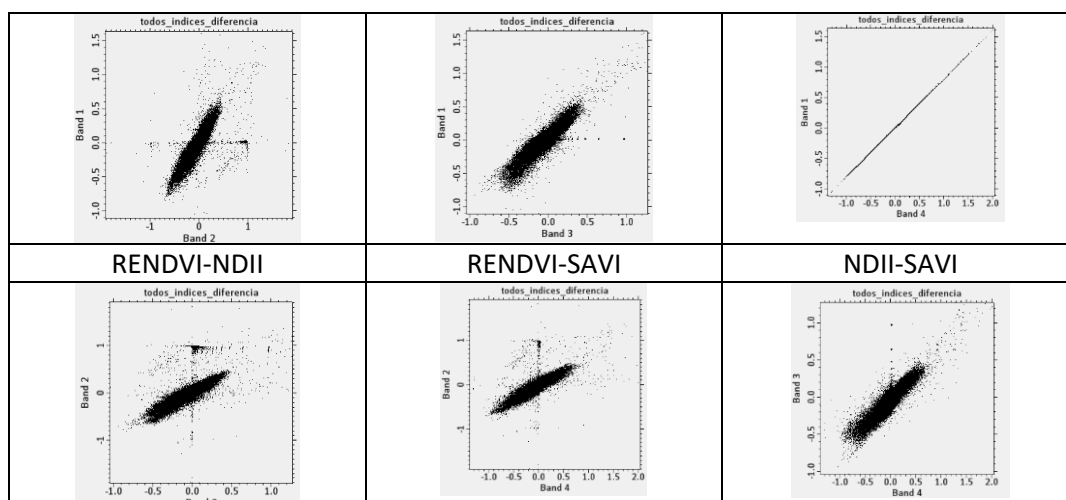


Figura 88 : Correlación gráfica entre imágenes diferencia.

Como se puede observar en la figura 88 las mayores correlaciones se producen entre el NDVI y el SAVI, aunque el resto de imágenes diferencia entre distintos índices está bastante correlacionado también. Como era de esperar las imágenes del NIR y del SWIR entre los meses de junio y abril no tienen mucha correlación al representar meses diferentes el estado de la vegetación es completamente diferente, aunque lo que sorprende es que el NIR de abril tenga mayor correlación con el SWIR de junio que con el NIR de junio.

Se puede observar en la siguiente tabla 11 con mayor exactitud de los valores de la matriz de correlaciones de las imágenes diferencia obtenidas.

Tabla 11: Matriz de correlaciones entre imágenes diferencia.

	SWIR ABRIL	SWIR JUNIO	NIR JUNIO	NDVI	NDII	RENDVI	SAVI
SWIR ABRIL	1.000000	0.489572	0.531669	-0.153305	-0.167952	-0.113639	-0.153273
SWIR JUNIO	0.489572	1.000000	0.830698	-0.709997	-0.710872	-0.685518	-0.710069
NIR JUNIO	0.531669	0.830698	1.000000	-0.509475	-0.592158	-0.378637	-0.509510
NDVI	-0.153305	-0.709997	-0.509475	1.000000	0.818168	0.867147	0.999996
NDII	-0.167952	-0.710872	-0.592158	0.818168	1.000000	0.809171	0.818547
RENDVI	-0.113639	-0.685518	-0.378637	0.867147	0.809171	1.000000	0.867212
SAVI	-0.153273	-0.710069	-0.509510	0.999996	0.818547	0.867212	1.000000

Se han marcado de color rojo las correlaciones más altas para cada imagen. Como se observa las imágenes diferencia entre bandas no tienen ningún tipo de correlación con las de los IV. El NDII y el RENDVI presentan las correlaciones más altas con el NDVI y el SAVI con valores muy parecidos con ambos. Después del NDVI y el SAVI que tienen una correlación casi del 100% con valores de 0,99, el RENDVI con estos dos índices es el índice que mayores correlaciones tiene con valores en torno a los 0,87.

5.3 SELECCIÓN DEL MÉTODO ÓPTIMO Y DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS DE TALA

5.3.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS: SELECCIÓN DEL MÉTODO ÓPTIMO.

Tras aplicar métodos diferentes para la detección de cambios en áreas forestales en las que se ha perdido masa forestal debido a las cortas producidas, es necesario verificar la calidad de los resultados obtenidos para estimar qué metodología será la más apropiada para cumplir con los objetivos del proyecto.

En la siguiente tabla 12 se presentan los umbrales de cambio establecidos para cada método, con la cuantificación de los cambios de densidad de cobertura forestal detectada y dentro de esta superficie detectada la superficie que realmente pertenece a cambios forestales y la que pertenece a otro tipo de terreno. Para ello se ha partido de los datos del inventario forestal en Gipuzkoa para el año 2016, y se ha determinado qué superficie de cambio detectada esta dentro de bosque y cual no, para saber así qué superficie pertenece a las cortas y cual a otro tipo de cambios no forestales. En la siguiente imagen 89 se pueden observar las zonas de bosque sobre la imagen de satélite.

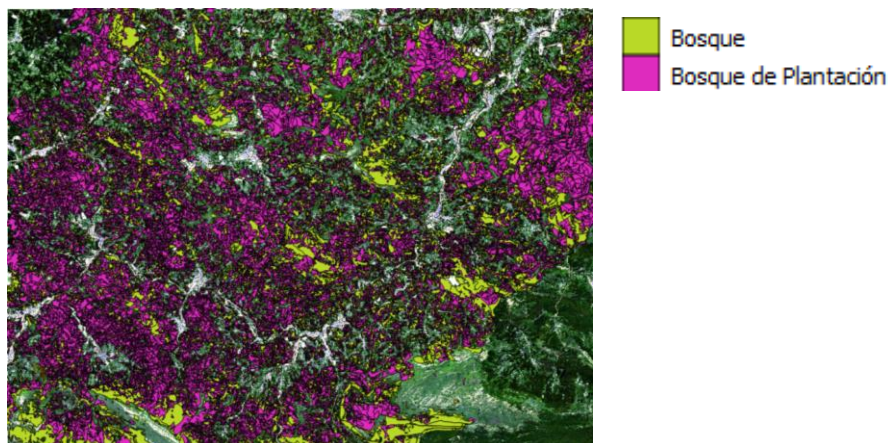


Figura 89: Polígonos de los bosques del Inventario Forestal de Guipúzcoa.

Tabla 12: Superficie de cambio detectada.

	umbral	píxeles	Sup. Cambio ha	Sup. Forestal ha	Sup. no forestal ha
SWIR	max.587,72	393,87	3938,7	2736,25	1202,45
NIR	max. 469,64	324,836	3248,36	2350,08	898,28
NDVI	min.- 0,1763	435,111	4351,11	2587,95	1763,16
RENDVI	min.-0,1763	353,525	3535,25	2280,29	1254,96
NDII	min. -0.2510	313,031	3130,31	1879,92	1250,39
SAVI	min.-0,22	433,795	4337,95	2577,71	1760,24
CP6	min. -824,42	352,026	3520,26	2249,78	1270,48

Como se puede observar, dependiendo del método utilizado y del umbral máximo o mínimo establecido la superficie detectada como cambio en la imagen varía. Dentro de esa superficie hay que tener en cuenta únicamente la superficie que pertenece a cambios en la masa forestal y que superficie no lo es. El NDII es el índice que menor cantidad de talas detecta, seguido del método de ACP, el que más cantidad de talas detecta es el SWIR seguido del NDVI. También hay que tener en cuenta los errores de omisión y comisión producidos por estos métodos, el que mayor cantidad de cambios detecta fuera del área forestal es el NDVI seguido del SAVI, y el que menos el NIR. Por esto se analizarán estos métodos a continuación más detalladamente.

Para valorar el grado de acuerdo de los resultados obtenidos con la realidad se compararán los resultados obtenidos con una fuente externa de información para verificar que las áreas detectadas como talas representan la realidad del terreno. Para ello, se han escogido polígonos de la base de datos de talas de la que se disponía previamente para el año 2016-2017, y se han seleccionado aquellos donde las talas se habían producido ya para la época de junio con la que se ha trabajado, en total se han utilizado 572,216 píxeles.

Se ha calculado el factor de defecto (FD), el ratio que indica el error de omisión correspondiente a la cantidad de píxeles que perteneciendo a talas no han sido detectadas y el factor de exceso (FE) que

constituye una medida del error de comisión por exceso correspondiente a la cantidad de píxeles que han sido detectados como talas y realmente no lo son. Para calcular estos errores se han aplicado las siguientes formulas, donde:

$$FE = \frac{FP}{TP} \quad FD = \frac{FN}{TP}$$

- Positivo Verdadero (TP): Píxeles de cambio que han sido detectados correctamente.
- Falso Negativo (FN): Píxeles de cambio que no han sido detectados.
- Falso Positivo (FP): Píxeles detectados como cambio pero que no lo son.

También se utilizará el porcentaje de detección (PD), para calcular el porcentaje de píxeles que se han clasificado correctamente teniendo en cuenta el total de píxeles verificados, esto es el porcentaje de superficie de cambio detectado correctamente, para calcular así la fiabilidad global de cada método. Por último se calculará el porcentaje de calidad (PC), para obtener una medida estricta sobre la calidad absoluta de la detección. Para que esta medida obtuviera un 100% de calidad el algoritmo de detección utilizado debería detectar correctamente todos los píxeles de cambio siendo (FN=0), sin que detecte píxeles de cambio que no lo sean (FP = 0).

$$PD = 100 \frac{TP}{TP + FN} \quad PC = 100 \frac{TP}{TP + FP + FN}$$

Tabla 13 : Resultados de los errores y porcentajes calculados para cada método.

	FD (omisión)	FE (comisión)	PD %	PC %
SWIR	0,10	0,44	91,26	68,60
NIR	0,11	0,38	90,36	71,12
NDVI	0,41	0,68	70,84	57,28
RENDVI	0,30	0,55	77,10	62,20
NDII	1,09	0,67	47,83	54,83
SAVI	0,41	0,68	70,69	57,21
CP6	0,21	0,56	82,66	62,16

Como se observa en la tabla 13, las bandas del NIR y del SWIR son las que menores errores por omisión y por comisión presentan presentando los mayores porcentajes de detección con valores por encima del 90% y de calidad por encima del 68%. Seguidos de estos métodos se encuentra el ACP y el IV del RENDVI con unos porcentajes de detección del 82,6% y 77,10% respectivamente y unos porcentajes de calidad del 62%. El IV del NDII es el que peores valores obtiene, debido a los altos errores de omisión, en cuanto a los errores de comisión son el NDVI el NDII y el SAVI con valores en torno a los 0,67 los que mayores errores presentan.

En líneas generales se puede decir en cuanto al porcentaje de detección de talas que salvo el NDII todos los métodos dan buenos resultados por encima del 70%, teniendo en el porcentaje de calidad estos valores bajan algo estando estos por encima del 57%. Se puede decir que la detección de talas con la banda del NIR será la que mejores resultados de, muy seguida de la banda del SWIR. Estas bandas serán el método óptimo en este caso ya que son los que más cantidad de superficie de cambio detectan, detectando también mayor superficie forestal y en comparación con el resto de metodologías son los que tienen menor cantidad de superficie de cambio detectada fuera de las zonas de bosque. Después de las bandas del NIR y del SWIR es el ACP la metodología que mejores resultados da, y entre los IV calculados el RENDVI será el que mejores resultados de para la detección de talas, seguido después del NDVI y del SAVI con resultados prácticamente similares, siendo el NDII como ya se ha mencionado antes, el IV que peor detecta las talas

5.3.2. DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS DE TALA PARA SU ESTUDIO.

Tras haber analizado los diferentes métodos para la detección de cambios y ver los diversos resultados, partiendo de los mejores resultados obtenidos para la detección de las superficies de tala mediante la diferencia de imágenes con la banda del NIR entre junio de 2016 y 2017, se hará un análisis del cambio de valores para las zonas de tala y no tala.

Tras aplicar el análisis de detección de cambios se han detectado cambios en una superficie total de 3249,04 ha, para delimitar bien las zonas de tala se aplicará una máscara para quedarse solo con las zonas forestales en el estudio ya que no interesan los cambios de vigor en la vegetación de prados o cultivos eliminando así los errores de comisión. Para ello partiendo de los datos del inventario forestal en Guipuzcúa, se cruzarán los polígonos de cambio detectado con las clases de bosque y bosque de galería del inventario forestal del año 2016.

Aun así si se mira la imagen con detalle se detectan áreas muy pequeñas de cambio que no servirán para el estudio de este trabajo, debido a que pueden ser polígonos de ruido producido por otro tipo de cambios. Como se ha mencionado al principio se analizaran solamente las cortas con una superficie mayor a media hectárea por las restricciones del tamaño de pixel de resolución de las imágenes de Sentinel-2. Así se evitarán confusiones y se hará un análisis más concreto de grandes talas mayores a 0.5 hectáreas para su análisis de cambio mediante índices de vegetación y pendiente de las parcelas

En la siguiente imagen se observan las zonas de tala iniciales obtenidas con el NIR, el inventario forestal superpuesto a estas y las zonas definitivas para el estudio superiores a 0,5ha tras aplicar los filtros.

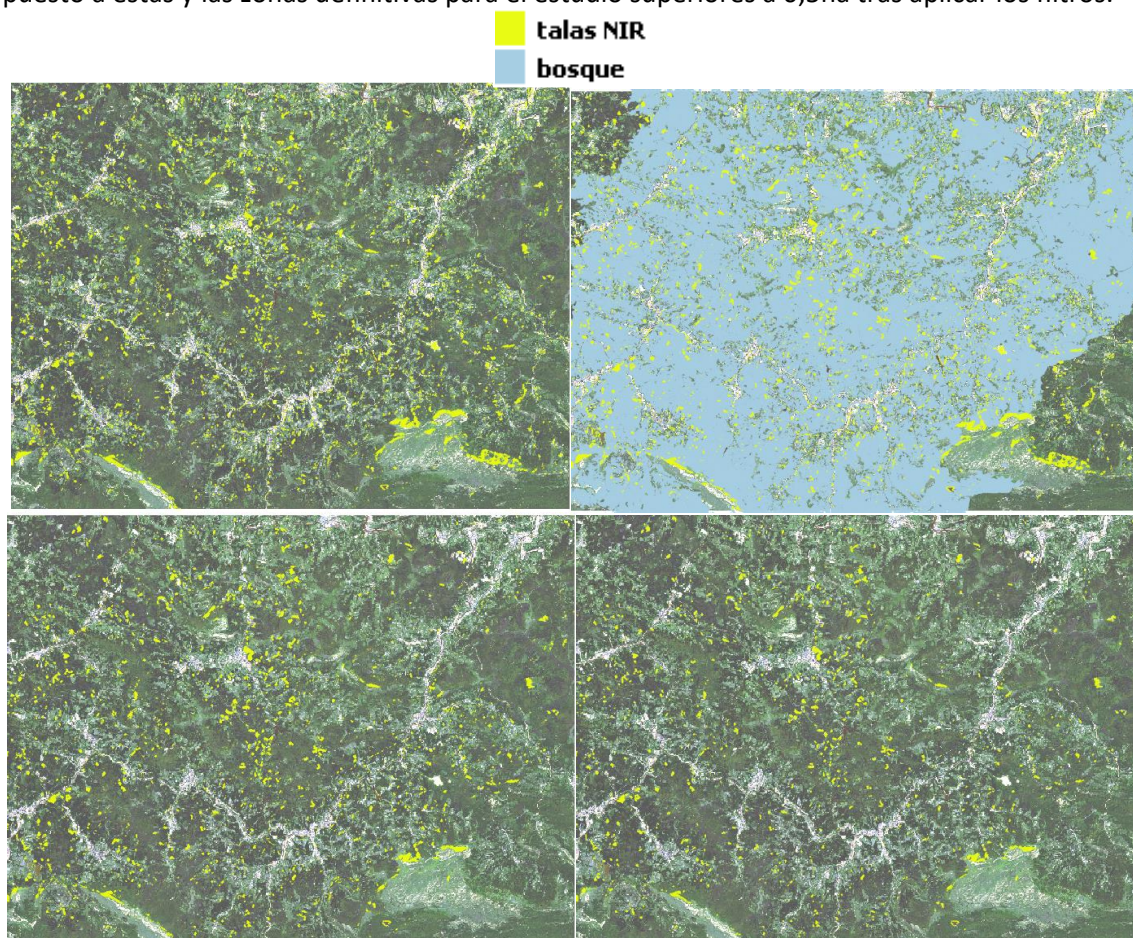


Figura 90: Cambios NIR(arriba izq.),Cambios NIR con zonas de bosque (arriba drcha.), NIR tras aplicar filtro de bosque (abajo izq.), NIR superior a 0,5ha tras aplicar filtro bosque (abajo drcha).

Tras aplicar estos filtros de las 3249,04 ha detectadas como cambios, los cambios pertenecientes a bosque serán 2350,08 ha y de ellas las que superan un tamaño mayor a 0,5 ha 2013,12 ha.

En la siguiente imagen se puede comparar el archivo de las talas del que se partía inicialmente con las superficies mayores a 0,5 ha de color rojo con una superficie de talas de 4882,79 ha y de color amarillo las 2013,12 ha.

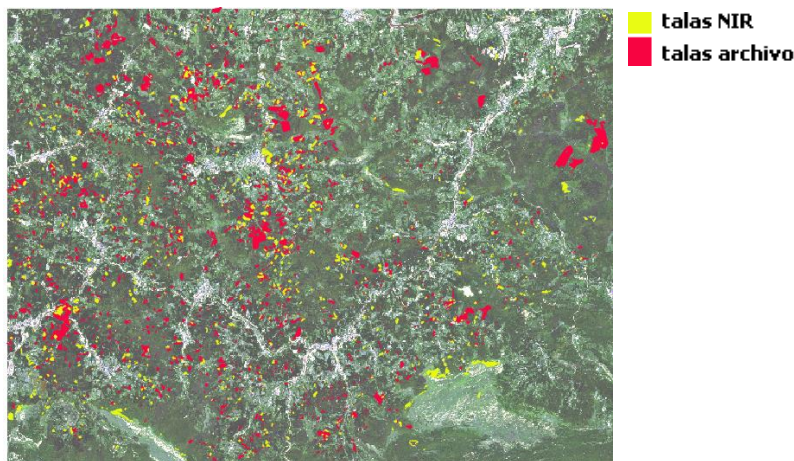


Figura 91 : Talas de archivo & talas detectadas.

Si se compararán ahora estos datos con el archivo de talas de la base de datos con las que se partía, se observa que no se corresponden muchas zonas, ya que muchas de las talas del archivo aun no se han producido para la época de estudio de la imagen de junio, ya que el documento del que se partía era un archivo de los permisos de corte para el 2016-2017. Aun así se observa que muchas de las talas detectadas no están en el documento, en total de las talas detectadas con el NIR han sido 1180,96 ha las que corresponden con la base de datos, quedando 1169,12 ha de talas nuevas detectadas que no estaban en la base de datos. Estas nuevas talas pueden ser debidas a que no se hayan pedido los permisos correspondientes para la corta o a que sean cortas cuyo permiso haya sido pedido en el periodo de 2015-2016 que no se hubieran efectuado aun ya que la licencia tiene dos años de vigor.

5.4 CÁLCULO DE ESTADÍSTICAS GENERALES DE LAS ZONAS DE TALA

Se realizará ahora el análisis de todas las zonas de tala en común, para ver los valores generales que se obtienen para los diferentes índices de vegetación en las zonas de tala para abril y junio de 2017, para comparar los valores de estos índices en los diferentes meses antes de la tala para el año 2016 y después de la tala para el año 2017 (Tabla 14).

Tabla 14: : Estadísticas de los IV para las zonas de tala.

	Min	Max	Mean	StdDev	Coef. Var.
ABRIL 2016					
NDVI	-0,9615	0,9827	0,0047	0,0618	13,06
RENDVI	-0,9444	0,7482	0,0031	0,0410	13,15
NDII	-0,9958	0,5808	0,0014	0,0202	14,41
SAVI	-1,1962	1,2281	0,0059	0,0773	13,06
ABRIL 2017					
NDVI	-0,9733	0,9685	0,0032	0,0448	13,95
RENDVI	-0,9412	0,8824	0,0020	0,0286	14,37
NDII	-0,9847	0,5502	0,0003	0,0131	42,66
SAVI	-1,2126	1,2104	0,0040	0,0560	13,95

JUNIO 2016					
NDVI	-0,8000	0,9987	0,0051	0,0665	13,00
RENDVI	-0,9916	0,9923	0,0038	0,0496	13,04
NDII	-0,9964	0,5820	0,0017	0,0238	13,60
SAVI	-0,9756	1,2482	0,0064	0,0832	13,00
JUNIO 2017					
NDVI	-0,9856	0,9388	0,0029	0,0392	13,71
RENDVI	-0,9899	0,7529	0,0018	0,0257	13,93
NDII	-0,9987	0,4457	-0,0001	0,0088	104,30
SAVI	-1,2298	1,1735	0,0036	0,0490	13,71

Como se ha mencionado antes, a mayor valor del coeficiente de variación mayor heterogeneidad tendrá ese IV siendo también mayor la dispersión, y a menor C.V., mayor será la homogeneidad. Observando los valores de los diferentes IV, se observa que la homogeneidad de estos será mayor en el mes de junio de 2016, seguido después del mes de abril de 2016. El NDVI y el SAVI son los IV que menor dispersión presentan, siendo el NDII con valores muy altos para 2017 el IV que presenta mayor heterogeneidad.

A continuación se presenta un gráfico con los valores medios de estos IV de todas las talas detectadas en la zona de estudio de Guipúzcoa para las diferentes fechas, para poder hacer un análisis más detallado del comportamiento de estos (Fig.92).

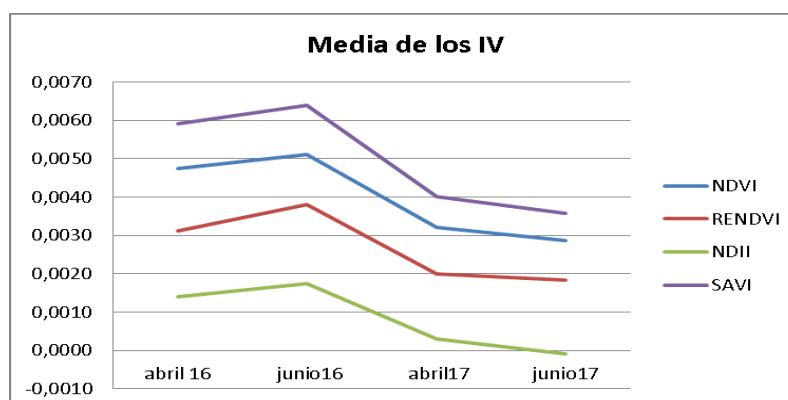


Figura 92: Gráfico de los valores de la media de los IV para las zonas de tala.

Como se puede observar en la figura 92, todos los índices tienen la misma tendencia aunque su rango de valores sea diferente. La tendencia general de estos es subir entre abril y junio en el año 2016 y bajar de abril a junio de 2017, siendo menor el valor de estos para 2017 que para 2016. El incremento de valor es debido a que la cubierta vegetal aumenta en junio debido al crecimiento de la vegetación para esta época aumentando también el valor de los IV, y la disminución de estos de abril a junio es debida a que la cantidad de talas en junio será mayor que en abril y al disminuir la cubierta vegetal los valores de los IV disminuyen también.

En el RENDVI las diferencias entre las diferentes fechas tienen mayor contraste y se dan cambios más bruscos. En los valores mínimos hay menores diferencias entre fechas, el NDVI y el SAVI tienen la misma tendencia. EL RENDVI se comporta de forma contraria a estos y el NDII tiene una tendencia casi constante. En los valores mínimos donde mayores diferencias se ven es en el SAVI seguido del NDVI, y en los valores máximos en cambio en el RENDVI seguido del SAVI. De todos los índices el que menores diferencias tiene es el NDII. En el caso del RENDVI al contrario que en el resto disminuyen los valores mínimos para el año 2017, cuando en el resto se produce un aumento.

Si se estudia la correlación entre los IV para estas zonas de tala, se observan en general correlaciones muy altas entre los índices para estas zonas forestales antes de producirse las talas. Tras la disminución y pérdida de masa vegetal debido a las talas se observa como los valores de los índices ya no tienen tanta correlación disminuyendo notablemente esta. El RENDVI-NDVI y RENDVI- SAVI son los índices que mayores correlaciones tienen tanto antes como después de las talas.

5.5 ESTUDIO DE DIFERENTES ÍNDICES EN ESPECIES

De todas las talas efectuadas se ha obtenido que las especies taladas han sido las siguientes: Abeto Douglas, Alerce, bosque mixto Atlántico, Cerezo, Chameciparis, Encina, Eucalipto Globulus, Eucalipto Nitens, Falsa Acacia, Haya, Pino Laricio, Pino Pináster, Vegetación, plantaciones de Frondosas variadas, plantaciones de Coníferas variadas, Rebollo, Roble Americano, Roble pedunculado y Secuoya.

En la siguiente tabla 15 se puede observar la superficie de tala de cada especie ordenada de mayor a menor. El Pino Radiata y el Pino Laricio seguidos del Alerce, Bosque mixto Atlántico y el Abeto Douglas serán las especies mayoritarias de tala superando las 29 ha, después seguirían el Eucalipto, el Roble Pedunculano y el Chameciparis con superficies mayores de las 10 ha. El resto de especies ya estarían por debajo de las 7 ha, siendo el Roble Americano, la Secuoya y la Encina las especies minoritarias de tala no llegando a las 2 ha. Se puede observar como las especies mayoritarias de tala como las Coníferas, el Alerce, el Abeto y el Roble coinciden con las especies mayoritarias del archivo de la base de datos.

Tabla 15: Superficie de tala por especies.

ESPECIE	Superficie ha
Pino Radiata	1744,53
Pino Laricio	72,54
Alerce	45,26
Bosque mixto Atlántico	40,59
Abeto Douglas	29,29
Eucalipto Nitens	14,81
Roble Pedunculano	12,13
Chameciparis	10,91
Plantaciones de Frondosas variadas	6,85
Pino Pináster	6,49
Eucalipto Globulus	6,21
Falsa Acacia	5,10
Plantaciones de Coníferas variadas	4,68
Cerezo	4,51
Haya	2,72
Rebollo	2,06
Encina	1,66
Secuoya	1,54
Roble Americano	1,24

En la siguiente tabla 16 se pueden observar los indicadores de aciertos en función de las especies.

Tabla 16: Porcentajes de acierto por especies

ESPECIE	TP ha	todos ha	FN	FD(error omisión)	PD %
Pino radiata	275,46	460,573	185,113	1,49	59,81
Pino Laricio	5,8003	13,3109	7,5106	0,77	43,58
Alerce	2,3915	6,3805	3,989	0,60	37,48
Bosque mixto Atlántico	3,3736	16,0309	12,6573	0,27	21,04
Abeto Douglas	4,2638	5,8056	1,5418	2,77	73,44
Eucalipto Nitens	6,3261	6,4467	0,1206	52,46	98,13
Roble Pedunculano	1,1579	11,3643	10,2064	0,11	10,19
Chameciparis	0,1987	0,6739	0,4752	0,42	29,49
Plantaciones de Frondosas variadas	0,0002	0,0364	0,0362	0,01	0,55
Pino Pináster	2,2728	4,1785	1,9057	1,19	54,39
Eucalipto Glóbulus	0,0201	0,1458	0,1257	0,16	13,79
Falsa Acacia	0,8056	2,8187	2,0131	0,40	28,58
Plantaciones de Coníferas variadas	0,0002	0,0321	0,0319	0,01	0,62
Castaño	0,171	0,2227	0,0517	3,31	76,78
Haya	1,3354	5,7835	4,4481	0,30	23,09
Plátano	0,0029	0,0979	0,095	0,03	2,96
Encina	0,0815	0,202	0,1205	0,68	40,35
Secuoya	0,0004	0,0954	0,095	0,00	0,42
Roble Americano	0,091	0,1058	0,0148	6,15	86,01

Para valorar el grado de acuerdo de los resultados obtenidos con la realidad se compararán los resultados obtenidos con la misma fuente externa de información que se ha utilizado antes para verificar el porcentaje de acierto en cada especie. Se han calculado todos los píxeles de cada especie detectados correctamente (TP), El total de píxeles de cada especie que había en la fuente de datos (Todos) para calcular así los (FN) píxeles de cambio de cada especie no detectados. Una vez obtenidos estos datos se ha procedido a calcular el error de omisión (FD) para determinar las talas que no han sido detectadas y el porcentaje de este error (PD), para calcular el porcentaje de píxeles que se han clasificado correctamente teniendo en cuenta el total de píxeles verificados.

Hay que tener en cuenta que estos valores dependen mucho de la muestra aleatoria que se ha tomado para la verificación ya que se ve que la cantidad de superficie dentro de la muestra de unas especies a otras varía mucho. Se puede decir según estos resultados que el Eucalipto Nitens, el Roble Americano y el Castaño son las especies que mejores porcentajes de acierto presentan. Siendo las plantaciones de frondosas y coníferas variadas, junto a las Secuoyas las que menor porcentaje de acierto presentan.

También se han hecho grupos de tala por especie y se ha calculado la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación para cada especie encontrada en el análisis de las cortas detectadas. Con estos valores calculados en las diferentes fechas, se analizarán las diferencias entre los diferentes IV en cada especie la Tabla 17 que se adjunta en el anexo 1 del apartado 8 de anexos.

La dinámica general de la evolución de los índices para las diferentes especies, es la que se ha visto en el apartado anterior cuando se hacía un análisis de todas las talas conjuntas. Los valores de los IV aumentan de abril a junio en 2016 y disminuyen de abril a junio en 2017, siendo los valores en 2016 mucho más altos que en 2017. Pero a pesar de eso, todas las especies no tienen los mismo valores y se comportan de diferente manera por lo que se analizarán mediante gráficos los valores medios de los IV en las diferentes fechas de estudio para hacer un análisis más detallado.

Para analizar mejor estos valores se realizará un gráfico para cada índice de vegetación para ver gráficamente la evolución de los valores medios de cada índice para el mes de junio y abril entre los años 2016 y 2017 en función de las especies. Estos gráficos y su análisis detallado se encuentran en el apartado 8.3 de Anexos, en el siguiente apartado se detallan a modo de resumen los resultados obtenidos.

5.5.1 ANÁLISIS GENERAL DE LOS IV POR ESPECIES.

Tras haber analizado los diferentes IV en las diferentes fechas se puede decir que el comportamiento de las especies sigue más o menos la misma distribución siendo sus rangos diferentes en función del índice, salvo en el caso del NDII que algunas especies cambian un poco su comportamiento tomando valores negativos tras la tala.

El rango de valores es igual que cuando se hacía el estudio general de todas las talas siendo el SAVI el que mayores valores presenta seguido del NDVI y del RENDVI, siendo los menores valores los del NDII. Como se ha mencionado anteriormente en el análisis de los IV, todos los IV en general toman mayores valores en 2016 que en 2017, y en abril que en junio, debido al estado de la cubierta vegetal en las diferentes fechas y antes y después de la tala.

Como se ha observado en todos los IV, las especies que menores diferencias presentan entre los valores en las diferentes fechas serán: las diferentes coníferas, el Alerce, el bosque mixto, el Abeto Douglas, el Roble Pedunculano, las Chameciparis, las plantaciones de Frondosas, la Falsa Acacia y la Haya. Y las especies que mayores valores darán en todos los índices, siendo también mayores sus diferencias tras la tala serán: los Eucaliptos, las plantaciones de Coníferas, el Rebollo, el Cerezo, la Encina, la Secuoya y el Roble Americano. Dándose en todos los casos en la Secuoya el Roble Americano, y las plantaciones de Coníferas los mayores valores medios en todos los meses y en todos los IV, presentando también las mayores diferencias de estos.

5.6 ESTUDIO CON LA PENDIENTE

A continuación se hará un estudio de como afecta la pendiente a los índices de Pino Radiata, para ello se ha realizado el cálculo de las pendientes medias para las diferentes zonas. Como se había observado al principio las zonas de estudio se encuentran en terrenos montañosos con bastante relieve. El valor medio de la pendiente para esta zonas va desde los 1.98 grados a los 38.99 grados de inclinación.

Se procederá a agrupar las zonas por pendientes, siendo la superficie correspondiente a cada pendiente la siguiente:

0 ° a 5 °: 3,96 ha
5 ° a 10 °: 42,71ha
10 ° a 15 °: 71,90 ha
15 ° a 20 °: 429,98 ha
20 ° a 25 °: 791,26 ha
25 ° a 30 °: 618,89 ha
30 ° a 35 °: 26,47 ha
35 ° a 40 °: 27,94 ha

Hay que añadir que son superficies muy diferentes, y es difícil comparar estadísticamente rangos con tamaños muestrales tan distintos.

Con estos grupos por pendientes, se ha calculado la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación para cada pendiente. Con estos valores calculados en las diferentes fechas, se analizarán las diferencias entre las diferentes zonas para ver que influencia tiene la inclinación y el terreno en cada IV, en la Tabla 18 que se adjunta en el anexo 2 del apartado 8 de anexos.

La dinámica general de la evolución de los índices para las diferentes pendientes, es también la que se ha visto en el apartado anterior cuando se hacía un análisis de las talas por especies. Los valores de los IV aumentan de abril a junio en 2016 y disminuyen de abril a junio en 2017, siendo los valores en 2016 mucho más altos que en 2017. Pero a pesar de eso, todas las pendientes no tienen los mismos valores y se comportan de diferente manera los IV en función del terreno por lo que se analizarán mediante gráficos los valores medios de los IV en las diferentes fechas de estudio para hacer un análisis más detallado.

Para analizar mejor estos valores se realizará un gráfico para cada IV en cada intervalo de pendientes, para ver gráficamente la evolución de los valores medios de cada índice para el mes de junio y abril entre los años 2016 y 2017 en función de las pendientes del terreno. Estos gráficos y su análisis detallado se encuentran en el apartado 8.4 de Anexos, en el siguiente apartado se detallan a modo de resumen los resultados obtenidos.

5.6.1 ANÁLISIS GENERAL DE LOS IV POR PENDIENTES

Tras haber analizado los diferentes IV en las diferentes fechas se puede decir que el comportamiento de estos en función de las especies sigue más o menos la misma distribución siendo sus rangos diferentes en función del índice, salvo en el caso del NDII que tras la tala los valores de 2017 cambian un poco su comportamiento tomando valores negativos.

El rango de valores es igual que cuando se hacía el estudio general de todas las talas y el de las talas por especies siendo el SAVI el que mayores valores presenta seguido del NDVI y del RENDVI, siendo los menores valores los del NDII. Como se ha mencionado anteriormente en el análisis de los IV, todos los IV en general toman mayores valores en 2016 que en 2017, y en abril que en junio, debido al estado de la cubierta vegetal en las diferentes fechas y antes y después de la tala.

Como se ha observado en todos los IV, las pendientes que menores diferencias presentan entre los valores en las diferentes fechas serán las pendientes entre los 5 y 10 grados y las de los terrenos con máximas pendientes con valores por encima de los 35 grados siendo en estas pendientes también donde se dan los valores medios mínimos en los diferentes IV. Y las pendientes que mayores valores darán en todos los índices, siendo también mayores sus diferencias tras la tala serán las pendientes de las zonas de planicie donde la inclinación no supera los 5 grados, seguidas después de las zonas entre los 20 y 25 grados.

Por lo que como se puede se puede decir que la tendencia general de los IV se repite ya que salvo en la zona de planicie donde los valores son máximos, el nivel de los IV va aumentando el valor desde los 5° a los 20°-25° y de ahí desciende según aumenta la pendiente hasta los 40°.

Hay que mencionar que las curvas que salen no son fácilmente interpretables con esa bajada tan brusca al principio y luego esa subida y bajada final, se estima que el tamaño tan diferente de la muestra tiene una importante influencia en cada rango siendo lo ideal sería plantear un análisis de los indicadores de acierto por pendientes para ver donde se producen mayores aciertos si en zonas llanas o en zonas de pendiente.

6. CONCLUSIONES

El Sentinel-2 es utilizado principalmente para el monitoreo de la tierra, la gestión de emergencias, la seguridad y el control del cambio climático, siendo una herramienta muy útil también para el control de la deforestación.

Como se ha visto las posibilidades para el estudio de la Tierra gracias imágenes obtenidas desde plataformas espaciales son muchas y muy variadas. Todos los métodos de detección de cambios siguen un procedimiento general en el que es necesario realizar el ajuste radiométrico y geométrico de la imagen antes de aplicar el método de detección, sin estas correcciones se detectarían falsas transformaciones de cobertura por falta de ajuste entre las imágenes. Los resultados obtenidos dependen mucho de la aplicación y el problema concreto para el que se emplee el método. Lo mejor es utilizar el método que más reduzca el número de errores y optimice su aplicación.

Los métodos de detección de cambios utilizados en este estudio han permitido observar y analizar cambios en el estado de la vegetación detectando las zonas que habían tenido una pérdida de masa forestal, mediante el uso de imágenes Sentinel-2 de fechas aniversario diferentes. Se han visto las grandes alternativas y posibilidades que ofrece este satélite para detectar perturbaciones y seguir cambios de determinado fenómeno natural en el tiempo y el espacio.

En el caso de las composiciones visuales se han visto las diferencias que se han obtenido al utilizar cada método con diferentes bandas y diferentes índices de vegetación, ya que los IV han sido unas herramientas muy utilizadas en la detección de cambios para el estudio de la deforestación al reforzar el componente vegetal.

Se ha visto la diferencia de valores entre áreas con cortas y sin cortas viendo cómo cambian los índices en estas zonas en función del periodo de tiempo y del estado de la masa forestal. También se han analizado los valores de estos índices para las diferentes especies forestales detectadas y en función también de la pendiente de la zona de estudio.

Analizando los diferentes IV calculados se ha observado que el coeficiente de variación de estos ha sido diferente, siendo el NDII el IV que mayor coeficiente ha presentado, seguido después del RENDVI, el NDVI y el SAVI. En cuanto a las correlaciones entre los IV, se puede decir que las mayores correlaciones se han producido entre el NDVI y el SAVI, seguidas luego del RENDVI con el SAVI y el NDVI.

La tendencia general de todos los IV ha sido un incremento en sus valores entre abril y junio tanto para el año 2016 como para el 2017. Esto se ha sido debido a que la cubierta vegetal ha aumentado en junio debido al crecimiento de la vegetación para esta época. En cuanto a los datos de los IV en las diferentes fechas aniversario, se ha observado un pequeño aumento en los valores medios de los IV para el año 2017 en ambas fechas salvo en el caso del NDII en el que los valores de Junio para el 2017 han disminuido en los valores medios de este índice.

Se ha visto como la técnica de elaborar composiciones multi temporales de color es sencilla y como ventaja adicional presenta la incorporación del conocimiento y criterio de análisis por parte del intérprete. También se ha visto como la interpretación del color depende de las fechas asignadas a cada uno de los colores básicos.

Se ha observado como el análisis visual de la detección de cubiertas de cortas es más difícil en las bandas del NIR en comparación con los resultados obtenidos para las bandas del SWIR ya que en el SWIR se detectan directamente los cambios bruscos y solo aparecen de tonos rojizos las zonas en las que se ha producido una corta y se esta reforestando a diferencia del NIR en la que se aprecian visualmente

pequeños cambios en el estado de la vegetación. Las composiciones mediante IV han obtenido mejores resultados visuales que las composiciones entre bandas, al definir mejor el contorno de las talas.

Como se ha comprobado existen métodos simples como la diferencia entre imágenes con los que se obtienen muy buenos resultados, se ha visto también como se puede llevar a cabo una diferencia de imágenes simple entre bandas empleado a nivel de ND en reflectancia y índices de vegetación. Siendo lo mejor utilizar la banda o índice que ofrezca mayor separabilidad para la detección de las talas forestales. En el caso de los índices de vegetación como los resultados dependen mucho del entorno, será muy importante utilizar imágenes aniversario para minimizar las diferencias en el ciclo fenológico de las cubiertas.

Se ha visto la importancia de la selección del umbral de detección en las imágenes diferencia para aislar los píxeles de cambio, estando este umbral directamente relacionado con la cantidad de errores de este. Los resultados generales que se han obtenido han sido bastante buenos, aunque se han observado algunas zonas de diferencias altas entre imágenes en las que se ha producido un cambio brusco en el estado de la vegetación de un año a otro y se detecta la diferencia confundiendo con las talas cuando no lo son. También en el caso de los prados o campos que han sido cortados tras la cosecha se pueden confundir detectándolos como cambios, esto ha sido subsanado después mediante la aplicación de una máscara para solo analizar la masa forestal.

El NDII ha sido el índice que menor cantidad de talas ha detectado, seguido del método de ACP, el que más cantidad de talas ha detectado ha sido el SWIR seguido del NDVI. También hay que tener en cuenta los errores de omisión y comisión producidos por estos métodos, el que mayor cantidad de cambios ha detectado fuera del área forestal ha sido el NDVI seguido del SAVI, y el que menos el NIR, siendo las bandas del NIR y del SWIR las que menores errores por omisión y por comisión han presentado con porcentajes de detección con valores por encima del 90% y de calidad por encima del 68%. Seguidos de estos métodos se encuentra el ACP y el IV del RENDVI con unos porcentajes de detección del 82,6% y 77,10% respectivamente y unos porcentajes de calidad del 62%. El IV del NDII ha sido el que peores valores ha obtenido, debido a los altos errores de omisión, en cuanto a los errores de comisión son el NDVI el NDII y el SAVI con valores en torno a los 0,67 los que mayores errores han presentado.

En líneas generales se puede decir en cuanto al porcentaje de detección de talas que salvo el NDII todos los métodos han dado buenos resultados por encima del 70%, teniendo en el porcentaje de calidad estos valores han bajado algo estando estos por encima del 57%. Se puede decir que la detección de talas con la banda del NIR será la que mejores resultados de, muy seguida de la banda del SWIR. Estas bandas serán el método óptimo en este caso ya que son las que más cantidad de superficie de cambio han detectado, y menos errores han obtenido.

El ACP, da la oportunidad de interpretar la información mediante datos estadísticos que sirven para discriminar los resultados, aunque las imágenes obtenidas son difíciles de interpretar. Este método es más complejo y es más adecuado cuando se quieren identificar pocas clases de cambio.

Los métodos basados en clasificación no se han llevado a cabo en este estudio, ya que son más utilizados cuando el número de clases a identificar es más elevado.

Estudiando la correlación entre los IV para las zonas de tala, se han observado en general correlaciones muy altas entre los índices para estas zonas forestales antes de producirse las talas. Tras la disminución y pérdida de masa vegetal debido a las talas se ha observado como los valores de los índices han disminuido la correlación. El RENDVI-NDVI y RENDVI-SAVI han sido los índices que mayores correlaciones han presentado tanto antes como después de las talas.

Analizando por especies el comportamiento de los IV en las diferentes fechas se puede decir que el comportamiento de las especies ha seguido mas o menos la misma distribución siendo sus rangos diferentes en función del índice, salvo en el caso del NDII que algunas especies han cambiado un poco su comportamiento tomando valores negativos tras la tala. En cuanto al rango de valores de los IV en las zonas de tala y por especies ha sido el SAVI el que mayores valores ha presentado seguido del NDVI y del RENDVI, siendo los menores valores los obtenidos por el NDII.

Tras haber analizado los diferentes IV en las diferentes fechas se puede decir que el comportamiento de estos en función de las especies ha seguido mas o menos la misma distribución siendo sus rangos diferentes en función del índice, salvo en el caso del NDII que tras la tala los valores de 2017 ha cambiado un poco su comportamiento tomando valores negativos.

En cuanto al análisis por especies se puede decir que en todos los IV se ha observado que las especies que menores diferencias han presentado entre los valores en las diferentes fechas han sido: los diferentes Pinos, el Alerce, el bosque mixto, el Abeto Douglas, el Roble Pedunculano, las Chameciparis, las plantaciones de Frondosas, la Falsa Acacia y la Haya. Y las especies que mayores valores han presentado siendo también mayores sus diferencias tras la tala han sido: los Eucaliptos, las plantaciones de Coníferas, el Rebollo, el Cerezo, la Encina, la Secuoya y el Roble Americano. Dándose en todos los casos en la Secuoya el Roble Americano, y las plantaciones de Coníferas los mayores valores medios en todos los meses y en todos los IV, presentando también las mayores diferencias de estos.

Para un mejor análisis de los resultados finales, se podría ampliar el estudio del análisis de los indicadores de acierto en función de las especies para el que no se ha tenido mucho tiempo y se ha visto influenciado por la superficie de verificación de las especies en el tamaño de la muestra. En un simple análisis se ha observado como las especies obtienen porcentajes de acierto muy diferentes, influyendo por tanto el tipo de especie en la detección de las cortas.

En cuanto al análisis por pendientes se puede decir que la tendencia general de los IV se ha repetido ya que salvo en la zona de planicie donde los valores han sido máximos, el nivel de los IV ha ido aumentando el valor desde los 5° a los 20°-25° y de ahí ha descendido con el aumento de la pendiente hasta los 40°. Hay que añadir que las curvas que salen no son fácilmente interpretables con esa bajada tan brusca al principio y luego esa subida y bajada final, se estima que el tamaño tan diferente de la muestra tiene una importante influencia en cada rango. Lo ideal sería plantear un análisis de los indicadores de acierto por pendientes para ver donde se producen mayores aciertos si en zonas llanas o en zonas de pendiente., esto no se ha podido llevar a cabo por falta de tiempo.

En el caso de este estudio ha sido mucho más importante el criterio de la resolución espectral y espacial que ofrece el sensor que el de la resolución temporal. Ya que las talas de árboles se producen espaciadas en el tiempo y es suficiente con tener imágenes de fechas aniversario en diferentes años, en cambio en el caso de estudios como en el seguimiento de catástrofes naturales se requiere información con más frecuencia que los 5 días con los que se obtienen las imágenes Sentinel-2 por lo que será más conveniente el uso de otros satélites que adquieran imágenes con mayor resolución temporal.

Para terminar cabe destacar la gran utilidad del uso de las imágenes multiespectrales obtenidas desde plataformas espaciales para la detección de cambios en la cubierta terrestre. En este caso se ha estudiado la capacidad de estas para la detección de cortas forestales, en las que se ha visto su capacidad para detectar pequeños cambios a grandes escalas, ya que los satélites ofrecen una visión global con grandes resoluciones de la cobertura de toda la tierra. Pudiendo hacer así un seguimiento mediante el uso de diferentes IV del estado de los bosques y todo tipo de cubiertas vegetales.

Hoy en día se disponen de una amplia gama de satélites que trabajan en distintas regiones del espectro electromagnético obteniendo imágenes con resoluciones espaciales y temporales muy diversas, estas imágenes se encuentran a disposición y uso de todos y gracias a ellas se pueden llevar a cabo análisis de la tierra de forma sencilla y económica en comparación con otros métodos. Sentinel-2 abre nuevas posibilidades en el mundo de la teledetección, con imágenes de mucha calidad que mejoran mucho las misiones operativas existentes.

7. BIBLIOGRAFÍA

Agapiou, A., Hadjimitsis, D. G. y Alexakis, D. D. (2012) «Evaluation of broadband and narrowband vegetation indices for the identification of archaeological crop marks», *Remote Sensing*, 4(12), pp. 3892-3919. doi: 10.3390/rs4123892.

Ahmad, F. (2012) «DETECTION OF CHANGE IN VEGETATION COVER USING MULTI-SPECTRAL AND MULTI-TEMPORAL INFORMATION FOR DISTRICT SARGODHA , PAKISTAN Detecção de alteração na cobertura vegetal com uso de informação multiespectral e multitemporal para o Distrito de Sargodha , Paqu», pp. 557-571.

Altay, N. y Green, W. G. (2006) «OR/MS research in disaster operations management», *European Journal of Operational Research*, 175(1), pp. 475-493. doi: 10.1016/j.ejor.2005.05.016.

Andres, L., Salas, W. A. y Skole, D. (1994) «Fourier-Analysis of Multitemporal Avhrr Data Applied to a Land-Cover Classification», *International Journal of Remote Sensing*, 15(5), pp. 1115-1121.

Arvor, D. *et al.* (2011) «Classification of MODIS EVI time series for crop mapping in the state of Mato Grosso, Brazil», *International Journal of Remote Sensing*, 32(22), pp. 7847-7871. doi: 10.1080/01431161.2010.531783.

Benali, A. *et al.* (2012) «Estimating air surface temperature in Portugal using MODIS LST data», *Remote Sensing of Environment*, 124, pp. 108-121. doi: 10.1016/j.rse.2012.04.024.

Bocco, G., Mendoza, M. y Masera, O. (2001) «La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán . Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación», *Investigaciones Geográficas UNAM*, 44, pp. 18-38. doi: <http://dx.doi.org/10.14350/rig.59133>.

Bours, D., McGinn, C. y Pringle, P. (2013) *Monitoring & evaluation for climate change adaptation : A synthesis of tools, frameworks and approaches, SEA Change CoP, Phnom Penh and UKCIP*.

Britch, S. C. *et al.* (2008) «Satellite vegetation index data as a tool to forecast population dynamics of medically important mosquitoes at military installations in the continental United States», *Military Medicine*, 173(7), pp. 677-683.

Carreira, J. A. y Xavier Niell, F. (1995) «Análisis De Componentes Principales Sobre Datos Multiespectrales "Landsat-Tm" E Interpretación De Cubiertas Vegetales En Las Sierras De Tejeda Y Almijara», *Acta Botanica Malacitana*, 20, pp. 153-164.

Chuvieco, E. (1998) «El factor temporal en teledetección : evolución fenomenológica y análisis de cambios», *Revista de Teledetección*, 10, pp. 1-9.

- Chuvieco, E. (1999) «Measuring changes in landscape pattern from satellite images: short-term effects of fire on spatial diversity», *International Journal of Remote Sensing*, 20(12), pp. 2331-2346. doi: 10.1080/014311699212056.
- Chuvieco, E. *et al.* (2002) «Estimation of fuel moisture content from multitemporal analysis of Landsat Thematic Mapper reflectance data: Applications in fire danger assessment», *International Journal of Remote Sensing*, 23(11), pp. 2145-2162. doi: 10.1080/01431160110069818.
- Chuvieco Salina, E. (2002) *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*, *Journal of Chemical Information and Modeling*. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- Chuvieco, E. (2009) «Teledetección ambiental», *International Journal of Remote Sensing*, pp. 2-4..
- Csillik, O. y Belgiu, M. (2016) «Cropland mapping from Sentinel-2 time series data using object-based image analysis», 2016.
- Coppin, P. R. y Bauer, M. E. (1994) «Processing of Multitemporal Landsat TM Imagery to Optimize Extraction of Forest Cover Change Features», *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(4), pp. 918-927. doi: 10.1109/36.298020.
- Coppin, P. R. y Bauer, M. E. (1996) «Change Detection in Forest Ecosystems with Remote Sensing Digital Imagery», *Remote Sensing Reviews*, 13, pp. 207-234. doi: 10.1080/02757259609532305.
- Coppin, P. R. y Bauer, M. E. (1996) «Change Detection in Forest Ecosystems with Remote Sensing Digital Imagery Digital Change Detection in Temperate Forests», *Remote Sensing Reviews*, 13, pp. 612-625. doi: 10.1080/02757259609532305.
- De Barros Ferraz, S. F. *et al.* (2005) «Landscape dynamics of Amazonian deforestation between 1984 and 2002 in central Rondônia, Brazil: Assessment and future scenarios», *Forest Ecology and Management*, 204(1), pp. 67-83. doi: 10.1016/j.foreco.2004.07.073.
- Deblonde, G. y Cihlar, J. (1993) «A multiyear analysis of the relationship between surface environmental variables and NDVI over the Canadian landmass», *Remote Sensing Reviews*, 7(2), pp. 151-177. doi: 10.1080/02757259309532172.
- Delegido, J. *et al.* (2016) «Aplicaciones de sentinel-2 a estudios de vegetación y calidad de aguas continentales», (November), pp. 1-15.
- Delegido, J. *et al.* (2011) «Evaluation of sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content», *Sensors*, 11(7), pp. 7063-7081. doi: 10.3390/s110707063.
- Díaz, R. D. *et al.* (2002) «Assessment of vegetation regeneration after fire through multitemporal analysis of AVIRIS images in the Santa Monica Mountains», *Remote Sensing of Environment*, 79(1), pp. 60-71. doi: 10.1016/S0034-4257(01)00239-5.
- Diputación Foral de Alava, Diputación Foral de Bizkaia y Diputación Foral de Gipuzkoa (1994) «Plan Forestal Vasco 1994-2030».
- Division, R. S. (2007) «Image classification», (2), pp. 1-18.

Drusch, M., Mecklenburg, S. y Kerr, Y. (2012) «SMOS over land: New applications for ESA's water mission», *European Space Agency Bulletin*, 2012(152), pp. 38-49.

Eduardo, C. y Angulo, P. (2011) «Análisis de la deforestación en Venezuela : bases para el establecimiento de una estrategia REDD +».

ESA (2015) «SENTINEL-2 User Handbook», (1), p. 64. doi: GMES-S1OP-EOPG-TN-13-0001.

ESA, 2016a. "ESA's Sentinel-2 Satellites". Disponible online: http://www.esa.int/esaLP/SEMM4T4KXMF_LPgmes_0.html (acceso el 30 junio 2016).

ESA, 2016b. "Sentinel-2 MSI. Level-2a Prototype Processor Installation and User Manual". Disponible online: <http://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.2.1/S2PAD-VEGA-SUM-0001-2.2.pdf> (acceso el 30 de junio 2016).

Evrendilek, F. y Gulbeyaz, O. (2008) «Deriving vegetation dynamics of natural terrestrial ecosystems from MODIS NDVI/EVI data over Turkey», *Sensors*, 8(9), pp. 5270-5302. doi: 10.3390/s8095270.

Ferrero, S. B., Palacio, M. G. y Campanella, O. R. (2002) «Análisis de componentes principales en teledetección . Consideraciones estadísticas para optimizar su interpretación», *Revista de Teledeteccion*, 17, pp. 43-54.

Friedmann J. y Weaver C., (1981) «Territorio y función: la evolución de la planificación regional» , *Instituto de Estudios de la administración local*. Madrid.

Frohn, R. C. y Hao, Y. (2006) «Landscape metric performance in analyzing two decades of deforestation in the Amazon Basin of Rondonia, Brazil», *Remote Sensing of Environment*, 100(2), pp. 237-251. doi: 10.1016/j.rse.2005.10.026.

Gamba, P., Dell'Acqua, F. y Lisini, G. (2006) «Change detection of multitemporal SAR data in urban areas combining feature-based and pixel-based techniques», *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(10), pp. 2820-2827. doi: 10.1109/TGRS.2006.879498.

García-cervigón, D. y José, J. (2015) «Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS / RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión .», p. 78.

Gao, B.-C. (1996) «NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space», *Remote Sensing of Environment*, 58(3), pp. 257-266. doi: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.

Gilabert, M. A., González-Piqueras, J. y García-Haro, J. (1997) «Acerca de los Indices de Vegetación», *Revista de Teledetección*, 8, pp. 1-10.

Gillanders, B. M. y Kingsford, M. J. (2003) «Spatial variation in elemental composition of otoliths of three species of fish (family Sparidae)», *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57(5-6), pp. 1049-1064. doi: 10.1016/S0272-7714(03)00009-X.

Gitelson, A. y Merzlyak, M. N. (1994) «Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves», *Journal of Photochemistry and Photobiology, B: Biology*, 22(3), pp. 247-252. doi: 10.1016/1011-1344(93)06963-4.

- Green, R. M. y Hay, S. I. (2002) «The potential of Pathfinder AVHRR data for providing surrogate climatic variables across Africa and Europe for epidemiological applications», *Remote Sensing of Environment*, 79(2-3), pp. 166-175. doi: 10.1016/S0034-4257(01)00270-X.
- Gómez, C., White, J. C. y Wulder, M. A. (2016) «Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review», *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, pp. 55-72. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2016.03.008.
- Green, G. M. y Sussman, R. W. (1990) «Deforestation History of the Eastern Rain Forests of Madagascar from Satellite Images», *Science*, 248(4952), pp. 212-215. doi: 10.1126/science.248.4952.212.
- Hamunyela, E. et al. (2016) «Monitoring deforestation at sub-annual scales as extreme events in landsat data cubes», *Remote Sensing*, 8(8). doi: 10.3390/rs8080651.
- Hill, J. y Sturm, B. (1991) «Radiometric Correction of Multitemporal Thematic Mapper Data for Use in Agricultural Land-Cover Classification and Vegetation Monitoring», *International Journal of Remote Sensing*, 12(7), pp. 1471-1491.
- Hirschmugl, M. et al. (2017) «Methods for Mapping Forest Disturbance and Degradation from Optical Earth Observation Data: a Review», *Current Forestry Reports*. Current Forestry Reports, pp. 32-45. doi: 10.1007/s40725-017-0047-2.
- Hlavka, C. A. y Spanner, M. A. (1995) «Unmixing AVHRR Imagery to Assess Clearcuts and Forest Regrowth in Oregon», *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(3), pp. 788-795. doi: 10.1109/36.387594.
- Howarth, P. J. y Wickware, G. M. (1981) «Procedures for change detection using Landsat digital data», *International Journal of Remote Sensing*, 2(3), pp. 277-291. doi: 10.1080/01431168108948362.
- Huete, A. R. (1988) «A soil-adjusted vegetation index (SAVI)», *Remote Sensing of Environment*, 25(3), pp. 295-309. doi: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
- Huete, A. R. et al. (1992) «Normalization of multidirectional red and NIR reflectances with the SAVI», *Remote Sensing of Environment*, 41(2-3), pp. 143-154. doi: 10.1016/0034-4257(92)90074-T.
- Hunt Jr, E. R. y Rock, B. N. (1989) «Detection of changes in leaf water content using Near- and Middle-Infrared reflectances», *Remote Sensing of Environment*, 30(1), pp. 43-54. doi: 10.1016/0034-4257(89)90046-1.
- Jiang, Z. et al. (2008) «Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band», *Remote Sensing of Environment*, 112(10), pp. 3833-3845. doi: 10.1016/j.rse.2008.06.006.
- Ji, L. et al. (2011) «On the terminology of the spectral vegetation index $(NIR - SWIR)/(NIR + SWIR)$ », *International Journal of Remote Sensing*, 32(21), pp. 6901-6909. doi: 10.1080/01431161.2010.510811.
- Joffre, R., Rambal, S. y Ratte, J. P. (1999) «The dehesa system of southern Spain and Portugal as a natural ecosystem mimic», *Agroforestry Systems*, 45(1-3), pp. 57-79.
- John Houghton, S. (1994) «The climate convention and the latest scientific understanding of climate change», *Renewable Energy*, 5(1-4), pp. 1-4. doi: 10.1016/0960-1481(94)90348-4.

Key, C. H. y N. Benson (2005): Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio., en FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System (editado por D. C. Lutes, R. E. Keane, J. F. Carattiet al). Ogden, UT, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164: CD: LA1-LA51.

Kumar, M. y Monteith, J. L. (1981) «Remote sensing of plant growth», *Plants and the Daylight Spectrum*, pp. 133-144.

Kummer, D. M. (1994) «The political use of Philippine forestry statistics in the postwar period», *Crime, Law and Social Change*, 22(2), pp. 163-180. doi: 10.1007/BF01308445.

Landscape, L. *et al.* (2016) «Using optical and SAR data for crops characterization and identification», (November), pp. 1-15.

Lasaponara, R. y Telesca, L. (2006) «Decadal variability in multitemporal satellite SPOT-VEGETATION NDII data», *International Journal of Remote Sensing*, 27(20), pp. 4685-4692. doi: 10.1080/01431160500165823.

Lee, T. Y. y Lawver, L. A. (1995) «Cenozoic plate reconstruction of Southeast Asia», *Tectonophysics*, 251(1-4), pp. 85-138. doi: 10.1016/0040-1951(95)00023-2.

Lunetta, R. S. *et al.* (1998) «A Change Detection Experiment Using Vegetation Indices», (April 2015).

Lu, D. y Weng, Q. (2007) «A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance», *International Journal of Remote Sensing*, 28(5), pp. 823-870. doi: 10.1080/01431160600746456.

Malingreau, J. P. y Tucker, C. J. (1987) «CONTRIBUTION OF AVHRR DATA FOR MEASURING AND UNDERSTANDING GLOBAL PROCESSES: LARGE-SCALE DEFORESTATION IN THE AMAZON BASIN.», en *Digest - International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*.

María Gonzalez de Audicana (sin fecha) «Contexto asignatura Contexto asignatura Planificación temporal del MUSIGT en Módulos y Asignaturas Contexto asignatura Competencias a adquirir en la asignatura de EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN DE IMÁGENES Contexto asignatura Metodología y evaluación de la asi».

Martin, M. P. y Chuvieco, E. (1995) «Mapping and evaluation of burned land from multitemporal analysis of AVHRR NDVI images», *EARSel Advances in remote sensing*, 4, pp. 7-13.

Mas, J. (2006) «Evaluación de Imágenes Modis para el Monitoreo de la Deforestación en México Evaluation of Modis Images to Monitor Deforestation in Mexico», *Ambiência*, 2, pp. 19-27. doi: 10.1083/jcb.200610071.

Matín, P., Díaz Delgado, R. y Chuvieco, E. (2002) «Burned land mapping using NOAA-AVHRR and TERRA-MODIS», *proceedings: Forest fire*, pp. 1-9. Disponible en: http://www.ebd.csic.es/ricardo/publi/Martin_etal_2002.pdf.

Maselli, F. *et al.* (1995) «Integration of ancillary data into a maximum-likelihood classifier with nonparametric priors», *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 50(2), pp. 2-11. doi: 10.1016/0924-2716(95)98210-Q.

Maseelli, F.; Consese, C.; De Filippis, T. y Norcini, S. (1995):" Estimation of forest parameters through fuzzy classification of TM data", IEEE. Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 33-77-84.

- Matton, N. *et al.* (2015) «An automated method for annual cropland mapping along the season for various globally-distributed agrosystems using high spatial and temporal resolution time series», *Remote Sensing*, 7(10), pp. 13208-13232. doi: 10.3390/rs71013208.
- Matthews, E. y Fung, I. (1987) «Methane emission from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics of sources», *Global Biogeochemical Cycles*, 1(1), pp. 61-86. doi: 10.1029/GB001i001p00061.
- Mcdonough, K. J. y Cross, T. A. (1991) «Late Cretaceous Sea Level From a Paleoshoreline», *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 96(B4), pp. 6591-6607. doi: 10.1029/91JB00281.
- Mefford, B.(2014). “Assesing corn wáter stress using spectral reflectance”. Tesis doctoral. Department of Civil and Environmental Engineering. Universidad Estatal de Colorado.
- Melendez-Pastor, I. *et al.* (2010) «Land-cover phenologies and their relation to climatic variables in an anthropogenically impacted mediterranean coastal area», *Remote Sensing*, 2(3), pp. 697-716. doi: 10.3390/rs2030697.
- Mertens, B. y Lambin, E. (1997) «Spatial modelling of deforestation in southern Cameroon», *Applied Geography*, 17(2), pp. 143-162. doi: 10.1016/S0143-6228(97)00032-5.
- Mihai, B. *et al.* (2017) «Recent forest cover changes (2002–2015) in the Southern Carpathians: A case study of the Iezer Mountains, Romania», *Science of the Total Environment*, 599-600, pp. 2166-2174. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.226.
- Millington, A. C., Velez-Liendo, X. M. y Bradley, A. V. (2003) «Scale dependence in multitemporal mapping of forest fragmentation in Bolivia: Implications for explaining temporal trends in landscape ecology and applications to biodiversity conservation», en *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, pp. 289-299. doi: 10.1016/S0924-2716(02)00154-5.
- Ngie, A., Ahmed, F., Abutaleb K.(2014). “Remote sensing potential for investigation of maize production: review of literature”. *South African Journal of Geomatics*, Vol. 3, No. 2, 163-184.
- Ngie, A. *et al.* (2014) «Assessment of urban heat island using satellite remotely sensed imagery: a review», *South African Geographical Journal*, 96(2), pp. 198-214. doi: 10.1080/03736245.2014.924864.
- Oliva, P. (2008) «ESPECTRALES Y TÉCNICAS PARA LA CARTOGRAFÍA DE ÁREA QUEMADA EN IMÁGENES MODIS Review of the use of several spectral indices and techniques to map burned area with MODIS images», pp. 129-152.
- Park, S. K. y Schowengerdt, R. A. (1983) «Image reconstruction by parametric cubic convolution», *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 23(3), pp. 258-272. doi: 10.1016/0734-189X(83)90026-9.
- Paruelo, J. M. y Lauenroth, W. K. (1998) «Interannual variability of NDVI and its relationship to climate for North American shrublands and grasslands», *Journal of Biogeography*, 25(4), pp. 721-733. doi: 10.1046/j.1365-2699.1998.2540721.x.
- Pereira, J. M. C., A. C. L. SA, A. M. O. Sousa, J. M. N. Silva, T. N. Santos y J. M. B. Carreiras (1999b): Spectral characterisation and discrimination of burnt areas, en *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin* (editado por E. Chuvieco). Berlin, Springer-Verlag: 123-138

- Petit, C. C. y Lambin, E. F. (2001) «Integration of multi-source remote sensing data for land cover change detection», *International Journal of Geographical Information Science*, 15(8), pp. 785-803. doi: 10.1080/13658810110074483.
- Politecnica, E. y Ejercito, D. E. L. (sin fecha) «Evaluación de técnicas de detección de cambios del uso de la tierra a través del análisis multitemporal de imágenes satelitales en el cantón daule».
- Radoux, J. *et al.* (2016) «Sentinel-2's potential for sub-pixel landscape feature detection», *Remote Sensing*, 8(6). doi: 10.3390/rs8060488.
- Redd-Ccad-Giz (2011) «Tipos de bosques y contexto del mapeo de la cobertura forestal en Centroamérica y República Dominicana», p. 20.
- Richards, J. A. (1984) «Thematic mapping from multitemporal image data using the principal components transformation», *Remote Sensing of Environment*, 16(1), pp. 35-46. doi: 10.1016/0034-4257(84)90025-7.
- Rignot, E. J. M. y van Zyl, J. J. (1993) «Change detection techniques for ERS-1 SAR data», *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 31(4), pp. 896-906. doi: 10.1109/36.239913.
- Robinove, C. J. (1982) «Computation with physical values from Landsat digital data», *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 48(5), pp. 781-784.
- Rogan, J. y J. Franklin (2001): Mapping wildfire burn severity in Southern California Forests and shrublands using enhanced Thematic Mapper imagery. *Geocarto International*, 16: 89-99.
- Rojas, S. (2011) «Evaluación de Metodologías para el procesamiento de imágenes satelitales para identificación de cambio de uso del suelo», p. 121.
- Rojas, S. (2014) «Método para la detección de cambios del paisaje en la Amazonia con base en sensores remotos», *Universidad Nacional de Colombia*.
- Ruiz Fernández, L. Á. (sin fecha) «Métodos de detección de cambios en teledetección».
- Sabins, F. F. (1999) «Remote sensing for mineral exploration», *Ore Geol Rev*, 14, pp. 157-183.
- Sandholt, I., Rasmussen, K. y Andersen, J. (2002) «A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status», *Remote Sensing of Environment*, 79(2-3), pp. 213-224. doi: 10.1016/S0034-4257(01)00274-7.
- Servello, E. L., Kuplich, T. M. y Shimabukuro, Y. E. (2010) «Tropical land cover change detection with polarimetric SAR data», en *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. doi: 10.1109/IGARSS.2010.5653215.
- Singh, A. (1989) «Digital change detection techniques using remotely-sensed data», *International Journal of Remote Sensing*, 10(6), pp. 989-1003. doi: 10.1080/01431168908903939.
- Sharma, L.K., Bu, H., Denton, A., Franzen, D. W. (2015). "Active-Optical Sensors Using Red NDVI Compared to Rededge NDVI for Prediction of Corn Grain Yield in North Dakota, U.S.A.". *Sensors*, 15, 27832-27853.
- Takken, W. *et al.* (2002) «Distribution and dynamics of larval populations of *Anopheles messeae* and *A. atroparvus* in the delta of the rivers Rhine and Meuse, The Netherlands», *Ambio*, 31(3), pp. 212-218.

Ulrich, R. S. (1981) «Ulrich 1981 Natural Versus Urban Scenes», *Environment and Behavior*, pp. 523-556. doi: 10.1177/0013916581135001.

Unesco (2012) «Análisis y modelación de deforestación para los años 1990, 2000 y 2010 en el corredor Manu-Amarakaeri», p. 43.

Vargas, F. (2002) «EMPLEO DE LA TELEDETECCIÓN EN EL ANÁLISIS DE LA DEFORESTACIÓN TROPICAL : EL CASO DE LA RESERVA FORESTAL DE TICOPORO (VENEZUELA)», *Serie Geográfica*, (10), pp. 55-76. doi: 1136-5277.

Verrelst, J. *et al.* (2012) «Machine learning regression algorithms for biophysical parameter retrieval: Opportunities for Sentinel-2 and -3», *Remote Sensing of Environment*, 118, pp. 127-139. doi: 10.1016/j.rse.2011.11.002.

Veettil, B. K. *et al.* (2016) «Glacier changes and related glacial lake expansion in the Bhutan Himalaya, 1990–2010», *Regional Environmental Change*, 16(5), pp. 1267-1278. doi: 10.1007/s10113-015-0853-7.

Wang, F. y Xu, Y. J. (2010) «Comparison of remote sensing change detection techniques for assessing hurricane damage to forests», pp. 311-326. doi: 10.1007/s10661-009-0798-8.

Yan, L. y Roy, D. P. (2015) «Improved time series land cover classification by missing-observation-adaptive nonlinear dimensionality reduction», *Remote Sensing of Environment*, 158, pp. 478-491. doi: 10.1016/j.rse.2014.11.024.

.

8. ANEXOS

8.1 ANEXO 1: TABLA DE ESTADÍSTICAS DE LOS IV POR ESPECIE.

Tabla 17: Evolución de los IV por especies.

		ABRIL2016			ABRIL 2017			JUNIO 2016			JUNIO 2017		
		Mean	StdDev	C.V.	Mean	StdDev	C.V.	Mean	StdDev	C.V.	Mean	StdDev	C.V.
Pino Radiata	NDVI	0,00386	0,05595	14,48	0,00264	0,04082	15,47	0,00415	0,05993	14,44	0,00232	0,03512	15,14
	RENDVI	0,00258	0,03756	14,57	0,00164	0,02614	15,97	0,00310	0,04493	14,49	0,00148	0,02290	15,44
	NDII	0,00115	0,01793	15,62	0,00026	0,01173	45,48	0,00139	0,02068	14,93	-0,00008	0,00738	92,26
	SAVI	0,00483	0,06993	14,48	0,00330	0,05102	15,47	0,00519	0,07490	14,44	0,00290	0,04390	15,14
Pino Laricio	NDVI	0,00022	0,01272	58,33	0,00015	0,00904	59,88	0,00025	0,01413	57,22	0,00015	0,00858	58,75
	RENDVI	0,00014	0,00839	59,10	0,00009	0,00562	61,71	0,00018	0,01008	57,59	0,00009	0,00550	59,78
	NDII	0,00005	0,00421	79,51	0,00001	0,00223	247,56	0,00008	0,00486	61,47	-0,00001	0,00185	231,00
	SAVI	0,00027	0,01589	58,21	0,00019	0,01130	59,80	0,00031	0,01767	57,17	0,00018	0,01072	58,91
Alerce	NDVI	0,00016	0,01139	72,99	0,00010	0,00741	77,15	0,00016	0,01188	73,32	0,00009	0,00704	76,53
	RENDVI	0,00010	0,00712	73,40	0,00006	0,00454	78,29	0,00012	0,00868	73,52	0,00006	0,00459	77,86
	NDII	0,00006	0,00450	74,97	0,00001	0,00183	304,17	0,00006	0,00474	75,24	-0,000002	0,00133	665,50
	SAVI	0,00020	0,01423	72,98	0,00012	0,00926	77,14	0,00020	0,01485	73,13	0,00012	0,00880	76,52
bosque mixto Atlántico	NDVI	0,00010	0,00952	98,19	0,00004	0,00515	119,65	0,00012	0,01045	90,08	0,00004	0,00591	164,22
	RENDVI	0,00006	0,00551	94,98	0,00003	0,00319	127,48	0,00009	0,00766	90,12	0,00003	0,00366	130,75
	NDII	0,00002	0,00420	200,19	-0,00001	0,00295	227,00	0,00004	0,00506	129,64	-0,00002	0,00366	215,29
	SAVI	0,00012	0,01190	97,50	0,00005	0,00643	121,26	0,00015	0,01305	90,03	0,00005	0,00738	163,96
Abeto douglas	NDVI	0,00015	0,01107	73,79	0,00011	0,00837	75,40	0,00016	0,01200	73,61	0,00009	0,00712	76,59
	RENDVI	0,00009	0,00698	74,27	0,00007	0,00506	76,70	0,00012	0,00844	73,41	0,00006	0,00452	79,30
	NDII	0,00005	0,00385	77,08	0,00002	0,00209	110,11	0,00007	0,00539	74,85	-0,000002	0,00157	785,50
	SAVI	0,00019	0,01383	73,59	0,00014	0,01046	75,80	0,00020	0,01500	73,51	0,00012	0,00890	76,76
Eucalipto nitens	NDVI	0,18069	0,26261	1,45	0,09905	0,16104	1,63	0,26017	0,37283	1,43	0,16138	0,23990	1,49
	RENDVI	0,10022	0,14677	1,46	0,05219	0,08938	1,71	0,17429	0,25041	1,44	0,09844	0,14730	1,50
	NDII	-0,00989	0,05575	5,64	-0,04575	0,08631	1,89	0,08242	0,13225	1,60	-0,00460	0,04926	10,70
	SAVI	0,22584	0,32824	1,45	0,12381	0,20128	1,63	0,32520	0,46602	1,43	0,20171	0,29985	1,49
Roble pedunculano	NDVI	0,00006	0,00710	110,88	0,00004	0,00422	117,28	0,00007	0,00806	110,47	0,00004	0,00470	120,41
	RENDVI	0,00004	0,00411	111,08	0,00002	0,00254	115,45	0,00005	0,00603	111,72	0,00003	0,00322	119,41
	NDII	0,00002	0,00201	118,18	0,00000	0,00102		0,00003	0,00319	113,89	0,000002	0,00098	488,50
	SAVI	0,00008	0,00887	109,49	0,00004	0,00528	119,93	0,00009	0,01008	110,76	0,00005	0,00587	119,80
Chameciparis	NDVI	0,00009	0,00873	100,32	0,00004	0,00399	107,95	0,00009	0,00879	99,88	0,00004	0,00407	107,16
	RENDVI	0,00006	0,00566	101,09	0,00002	0,00231	109,86	0,00006	0,00603	100,45	0,00002	0,00253	110,04
	NDII	0,00003	0,00332	103,69	-0,00001	0,00118	236,80	0,00003	0,00337	102,09	-0,00001	0,00125	178,00
	SAVI	0,00011	0,01091	100,08	0,00005	0,00499	108,52	0,00011	0,01099	100,78	0,00005	0,00509	108,28

Fronosas variadas	NDVI	0,00006	0,00677	109,15	0,00005	0,00567	111,08	0,00007	0,00802	108,36	0,00004	0,00494	114,84
	RENDVI	0,00004	0,00410	110,73	0,00003	0,00357	111,66	0,00005	0,00563	108,23	0,00003	0,00336	115,83
	NDII	0,00002	0,00217	120,67	0,00001	0,00135	122,82	0,00003	0,00340	109,65	0,000001	0,00108	1075,00
	SAVI	0,00008	0,00846	109,86	0,00006	0,00708	110,64	0,00009	0,01002	108,95	0,00005	0,00617	114,31
Pino pinaster	NDVI	0,00004	0,00527	142,41	0,00003	0,00413	152,81	0,00004	0,00587	143,27	0,00003	0,00404	144,18
	RENDVI	0,00003	0,00358	143,04	0,00002	0,00281	155,89	0,00003	0,00415	143,07	0,00002	0,00257	142,56
	NDII	0,00001	0,00180	149,92	0,00001	0,00150	300,80	0,00002	0,00230	143,44	0,000001	0,00059	591,00
	SAVI	0,00005	0,00659	143,15	0,00003	0,00516	151,68	0,00005	0,00734	143,96	0,00004	0,00505	144,17
Eucalipto Globulus	NDVI	0,33919	0,37127	1,09	0,31368	0,34404	1,10	0,40531	0,44093	1,09	0,27309	0,30513	1,12
	RENDVI	0,20422	0,22514	1,10	0,19116	0,21154	1,11	0,27910	0,30460	1,09	0,17254	0,19733	1,14
	NDII	0,08006	0,10332	1,29	0,06053	0,08801	1,45	0,18750	0,20642	1,10	0,02839	0,06497	2,29
	SAVI	0,42395	0,46405	1,09	0,39207	0,43002	1,10	0,50661	0,55114	1,09	0,34134	0,38138	1,12
falsa Acacia	NDVI	0,00007	0,00765	109,21	0,00005	0,00541	120,24	0,00008	0,00842	109,35	0,00005	0,00520	115,47
	RENDVI	0,00005	0,00501	111,27	0,00003	0,00340	121,46	0,00006	0,00648	109,80	0,00003	0,00359	115,68
	NDII	0,00002	0,00257	116,64	0,00001	0,00156	195,50	0,00003	0,00337	108,84	0,00001	0,00113	160,71
	SAVI	0,00009	0,00956	109,83	0,00006	0,00676	120,77	0,00010	0,01052	109,63	0,00006	0,00650	115,98
Coníferas variadas	NDVI	0,45292	0,39483	0,87	0,47947	0,41690	0,87	0,51578	0,44729	0,87	0,28204	0,25367	0,90
	RENDVI	0,27468	0,23995	0,87	0,30631	0,26626	0,87	0,35890	0,31280	0,87	0,17380	0,16930	0,97
	NDII	0,13383	0,12718	0,95	0,17834	0,16146	0,91	0,22497	0,19817	0,88	-0,04903	0,07569	1,54
	SAVI	0,56611	0,49350	0,87	0,59930	0,52109	0,87	0,64470	0,55909	0,87	0,35251	0,31705	0,90
Cerezo	NDVI	0,39105	0,40290	1,03	0,39672	0,40907	1,03	0,42603	0,43776	1,03	0,19919	0,22625	1,14
	RENDVI	0,23788	0,24581	1,03	0,25105	0,25894	1,03	0,28379	0,29265	1,03	0,11782	0,15089	1,28
	NDII	0,14545	0,15369	1,06	0,15181	0,16110	1,06	0,19759	0,20505	1,04	-0,03145	0,08347	2,65
	SAVI	0,48878	0,50360	1,03	0,49587	0,51131	1,03	0,53251	0,54718	1,03	0,24898	0,28280	1,14
Haya	NDVI	0,00048	0,01974	41,21	0,00027	0,01140	42,52	0,00051	0,02106	41,20	0,00029	0,01224	42,93
	RENDVI	0,00029	0,01211	41,34	0,00016	0,00656	42,29	0,00039	0,01605	41,26	0,00019	0,00855	44,32
	NDII	0,00015	0,00619	42,41	-0,00002	0,00214	134,00	0,00018	0,00757	42,52	-0,00002	0,00270	112,67
	SAVI	0,00060	0,02467	41,19	0,00034	0,01424	42,52	0,00064	0,02632	41,18	0,00036	0,01529	42,96
Rebollo	NDVI	0,14036	0,25431	1,81	0,07635	0,14208	1,86	0,20653	0,37380	1,81	0,08410	0,17103	2,03
	RENDVI	0,05588	0,10356	1,85	0,03541	0,06907	1,95	0,15819	0,28600	1,81	0,05068	0,11056	2,18
	NDII	0,01862	0,04926	2,65	-0,02718	0,05971	2,20	0,08084	0,15011	1,86	-0,02166	0,06254	2,89
	SAVI	0,17543	0,31786	1,81	0,09543	0,17758	1,86	0,25815	0,46723	1,81	0,10512	0,21377	2,03
Encina	NDVI	0,10113	0,27649	2,73	0,06100	0,17181	2,82	0,10753	0,29382	2,73	0,06705	0,18768	2,80
	RENDVI	0,06716	0,18456	2,75	0,03712	0,10523	2,83	0,07833	0,21428	2,74	0,04393	0,12487	2,84
	NDII	0,03752	0,10505	2,80	0,00510	0,03380	6,62	0,04065	0,11325	2,79	0,00481	0,03291	6,84
	SAVI	0,12640	0,34558	2,73	0,07625	0,21474	2,82	0,13441	0,36724	2,73	0,08381	0,23458	2,80
Secuoya	NDVI	0,40087	0,29186	0,73	0,58782	0,42436	0,72	0,57805	0,41730	0,72	0,41771	0,30374	0,73
	RENDVI	0,22967	0,16813	0,73	0,39344	0,28446	0,72	0,37110	0,26825	0,72	0,24989	0,18526	0,74
	NDII	0,11697	0,08852	0,76	0,27974	0,20452	0,73	0,26520	0,19302	0,73	0,04730	0,05300	1,12
	SAVI	0,50106	0,36480	0,73	0,73473	0,53042	0,72	0,72253	0,52160	0,72	0,52210	0,37965	0,73

Roble americano	NDVI	0,46086	0,41602	0,90	0,25361	0,25577	1,01	0,52195	0,47009	0,90	0,20210	0,21908	1,08
	RENDVI	0,21247	0,19669	0,93	0,16714	0,17312	1,04	0,42220	0,38098	0,90	0,13286	0,15937	1,20
	NDII	0,18616	0,17399	0,93	0,02678	0,07292	2,72	0,23677	0,21525	0,91	-0,03579	0,07678	2,15
	SAVI	0,57603	0,51997	0,90	0,31699	0,31968	1,01	0,65239	0,58757	0,90	0,25260	0,27382	1,08

8.2 ANEXO 2: TABLA DE ESTADÍSTICAS DE LOS IV POR PENDIENTE.

Tabla 18: Evolución de los IV por pendiente,

		ABRIL 2016			ABRIL 2017			JUNIO 2016			JUNIO 2017		
		Mean	StdDev	C.V.	Mean	StdDev	C.V.	Mean	StdDev	C.V.	Mean	StdDev	C.V.
0°-5°	NDVI	0,00249	0,04563	18,31	0,00105	0,02054	19,58	0,00264	0,04825	18,28	0,00143	0,02763	19,29
	RENDVI	0,00166	0,03083	18,54	0,00068	0,01349	19,73	0,00197	0,03618	18,38	0,00095	0,01830	19,37
	NDII	0,00092	0,01741	18,90	-0,00003	0,00642	229,43	0,00100	0,01855	18,60	0,00009	0,00649	75,50
	SAVI	0,00312	0,05704	18,31	0,00131	0,02568	19,59	0,00330	0,06031	18,28	0,00179	0,03454	19,29
5°-10°	NDVI	0,00010	0,00886	88,63	0,00006	0,00618	103,03	0,00011	0,00958	88,72	0,00005	0,00521	102,10
	RENDVI	0,00006	0,00565	89,67	0,00004	0,00395	106,73	0,00008	0,00684	88,81	0,00003	0,00340	106,25
	NDII	0,00003	0,00282	97,34	0,00000	0,00209	522,75	0,00004	0,00333	95,23	-0,00001	0,00144	206,14
	SAVI	0,00013	0,01108	88,62	0,00008	0,00773	101,67	0,00014	0,01198	88,71	0,00006	0,00651	101,69
10°-15°	NDVI	0,00019	0,01246	65,92	0,00013	0,00896	71,70	0,00020	0,01330	65,84	0,00011	0,00766	70,91
	RENDVI	0,00013	0,00830	66,37	0,00008	0,00577	73,91	0,00015	0,00976	65,95	0,00007	0,00495	72,85
	NDII	0,00006	0,00432	70,79	0,00001	0,00278	198,43	0,00007	0,00476	68,06	-0,00001	0,00176	293,33
	SAVI	0,00024	0,01557	65,98	0,00016	0,01120	71,81	0,00025	0,01662	65,70	0,00014	0,00957	70,90
15°-20°	NDVI	0,00097	0,02810	29,09	0,00066	0,02065	31,34	0,00103	0,02991	29,01	0,00057	0,01737	30,59
	RENDVI	0,00065	0,01906	29,27	0,00042	0,01347	32,38	0,00077	0,02227	29,11	0,00036	0,01122	31,24
	NDII	0,00031	0,00956	31,13	0,00008	0,00636	78,46	0,00036	0,01072	29,96	-0,00002	0,00377	164,09
	SAVI	0,00121	0,03512	29,10	0,00082	0,02581	31,33	0,00129	0,03738	29,00	0,00014	0,00957	70,90
20°-25°	NDVI	0,00161	0,03615	22,48	0,00108	0,02597	23,95	0,00173	0,03882	22,42	0,00096	0,02250	23,56
	RENDVI	0,00107	0,02413	22,64	0,00067	0,01654	24,68	0,00129	0,02903	22,48	0,00061	0,01463	24,06
	NDII	0,00049	0,01176	23,95	0,00010	0,00734	72,68	0,00060	0,01388	23,14	-0,00004	0,00480	123,08
	SAVI	0,00201	0,04518	22,48	0,00136	0,03246	23,95	0,00217	0,04853	22,41	0,00119	0,02812	23,55
25°-30°	NDVI	0,00122	0,03153	25,88	0,00085	0,02320	27,29	0,00133	0,03397	25,64	0,00076	0,02054	27,17
	RENDVI	0,00080	0,02085	26,02	0,00052	0,01466	27,97	0,00099	0,02538	25,69	0,00049	0,01342	27,27
	NDII	0,00034	0,01038	30,25	0,00008	0,00663	81,80	0,00044	0,01216	27,57	-0,00002	0,00514	285,28
	SAVI	0,00152	0,03940	25,89	0,00106	0,02899	27,30	0,00166	0,04246	25,62	0,00095	0,02567	27,16
30°-35°	NDVI	0,00055	0,02080	37,81	0,00036	0,01460	40,77	0,00060	0,02274	37,64	0,00034	0,01329	39,32
	RENDVI	0,00036	0,01358	38,15	0,00022	0,00915	42,56	0,00045	0,01696	37,78	0,00022	0,00868	40,16
	NDII	0,00014	0,00611	44,29	0,00001	0,00422	469,11	0,00019	0,00752	39,55	-0,00002	0,00270	158,76
	SAVI	0,00069	0,02599	37,83	0,00045	0,01824	40,81	0,00076	0,02842	37,64	0,00042	0,01661	39,37
35°-40°	NDVI	0,00014	0,01039	75,82	0,00010	0,00802	80,23	0,00015	0,01136	75,70	0,00009	0,00677	78,70
	RENDVI	0,00009	0,00661	75,97	0,00006	0,00510	82,23	0,00011	0,00840	75,64	0,00006	0,00452	79,21
	NDII	0,00003	0,00273	82,85	0,00001	0,00223	171,46	0,00005	0,00362	77,09	-0,00001	0,00111	1113,00
	SAVI	0,00017	0,01298	75,48	0,00012	0,01003	80,87	0,00019	0,01419	75,49	0,00011	0,00846	78,32

8.3 ANEXO 3: ESTUDIO DETALLADO DE LOS ÍNDICES POR ESPECIES

En este anexo se realizará un análisis más exhaustivo de los resultados obtenidos al analizar los diferentes IV en función de las especies.

8.3.1 NDVI

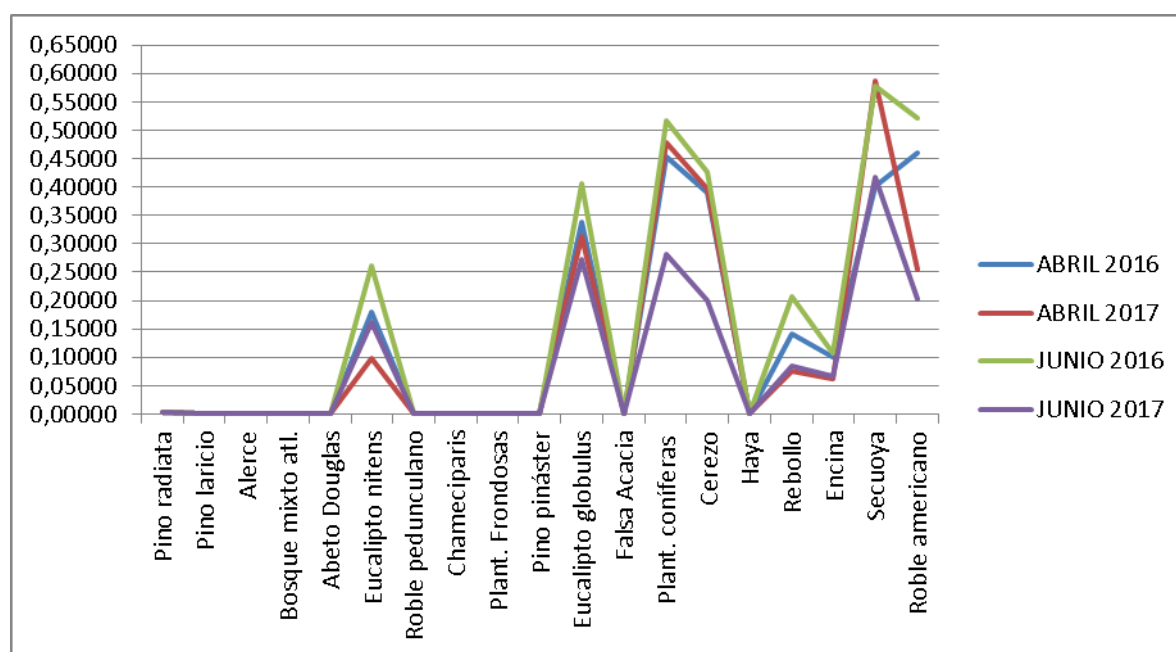


Figura 93 : Valores medios del NDVI por especies.

El comportamiento del NDVI en las diferentes especies sigue la misma tendencia en las diferentes fechas, aunque su rango de valores sea diferente. En la mayoría de especies los cambios entre las diferentes fechas son muy pequeños como se puede observar en la figura 93, un montón de especies tienen valores entre los 0,004 y los 0,0003 siendo entre estos el Pino Radiata la especie que mayores diferencias presenta entre junio de 2016 donde los valores del índice son los más elevados, y junio de 2017 cuando tras la tala estos valores disminuyen con unas diferencias en los valores medios de 0,0018. La especie que menores diferencias presenta entre estos sería el Pino Pináster con una diferencia de 0,00001.

Las especies como los Eucaliptos, las plantaciones de Coníferas, el Rebollo, el Cerezo, la Encina, la Secuoya y el Roble Americano presentan valores más altos en la media del NDVI para todas las fechas como se puede observar en el gráfico. Será la Secuoya, seguida del Roble Americano y las plantaciones de Coníferas los que tengan valores más altos de NDVI con valores en torno a los 0,58-0,51, entre estos las especies que presentan mayores cambios en el descenso de la media son el Roble Americano, las coníferas y el Cerezo con diferencias en torno a los 0,32-0,23.

8.3.2 RENDVI

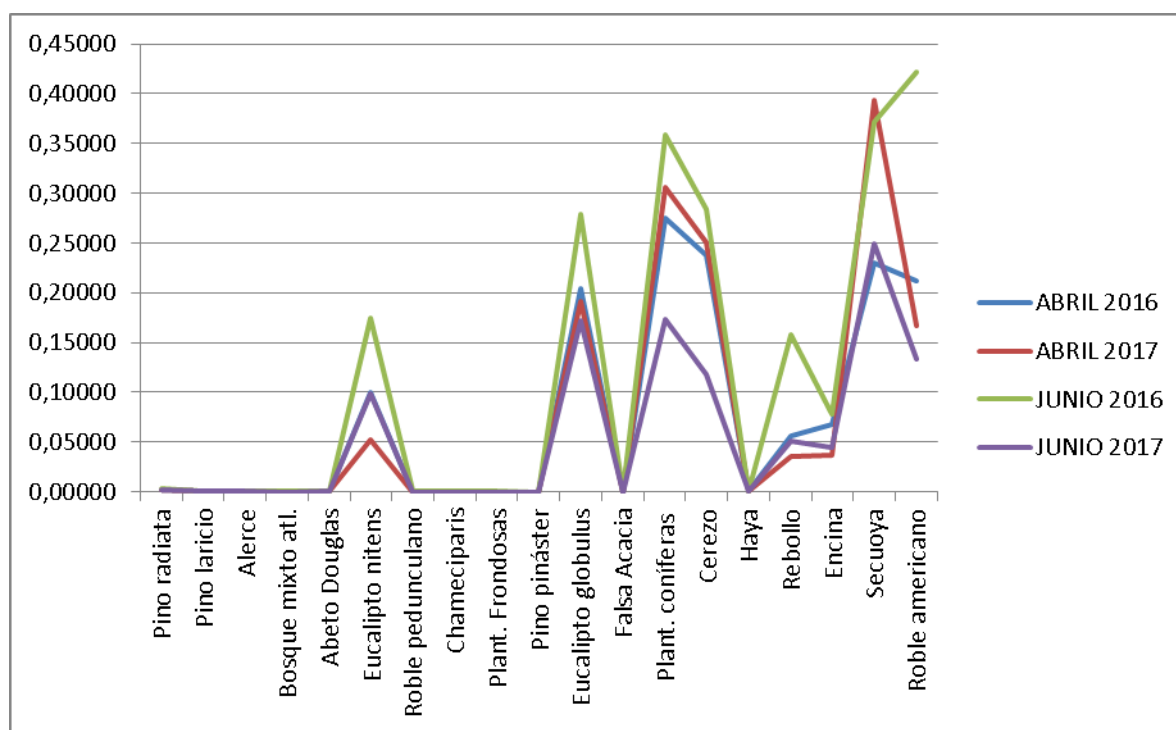


Figura 94 : Valores medios del RENDVI por especies.

El comportamiento del RENDVI para las diferentes especies sigue más o menos la misma tendencia en las diferentes fechas, aunque su rango de valores sea diferente entre los diferentes meses. En este caso también en la mayoría de especies los cambios entre las diferentes fechas son muy pequeños como se puede observar en la figura 94, muchas especies tienen valores entre los 0,003 y los 0,0002 siendo entre estos el Pino Radiata la especie que mayores diferencias presenta con valores medios de 0,0016 (un poco menores que para el NDVI). La especie que menores diferencias presenta entre estos sería el Pino Pináster con una diferencia de 0,00001, seguido de las plantaciones de Frondosas con diferencias en torno a los 0,00002.

Al igual que como ocurría con el NDVI, las especies como los Eucaliptos, las plantaciones de Coníferas, el Rebollo, el Cerezo, la Encina, la Secuoya y el Roble Americano presentan valores más altos en el NDVI para todas las fechas como se puede observar en el gráfico. Será el Roble Americano, seguido de la Secuoya y las plantaciones de Coníferas los que tengan valores más altos de NDVI con valores en torno a los 0,42-0,39, menores también que en el caso del NDVI. Entre estos las especies que presentan mayores cambios en el descenso de los valores medios entre el 2016 y el 2017 son de nuevo el Roble Americano, las Coníferas y el Cerezo con diferencias en torno a los 0,29-0,16.

En general se observa la misma tendencia entre las especies entre este índice y el NDVI, siendo el rango de valores y las diferencias entre los valores medios para el RENDVI algo menores en este caso.

8.3.3 NDII

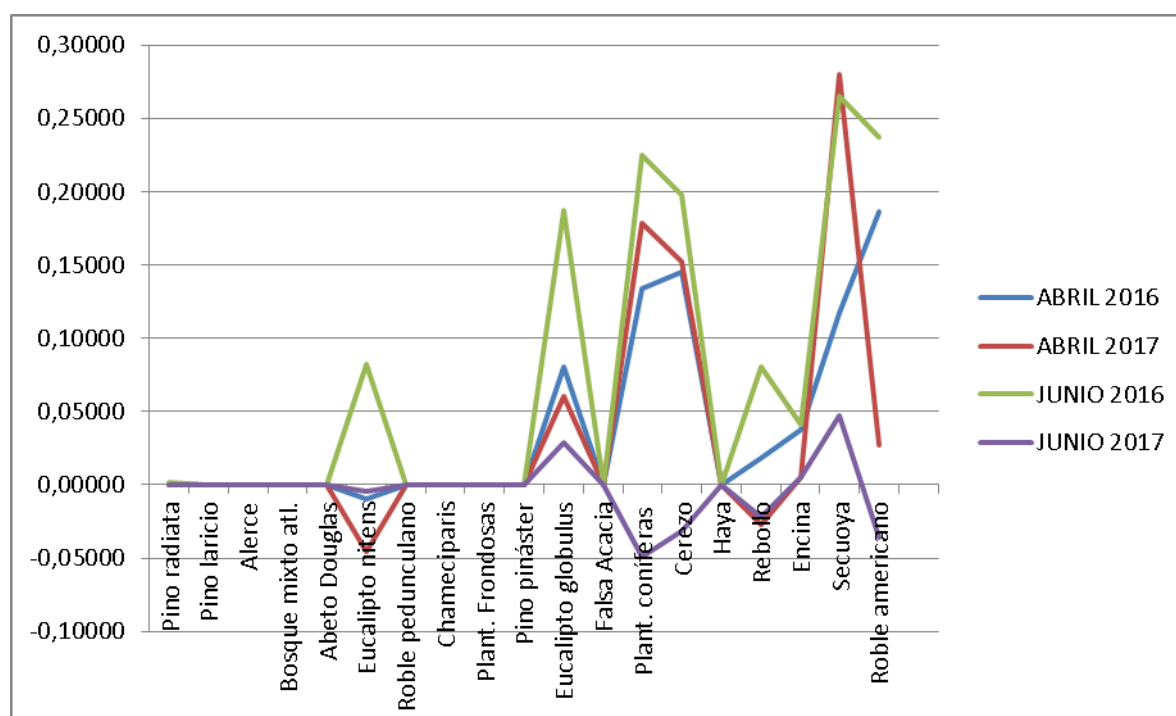


Figura 95 : Valores medios del NDII por especies.

El comportamiento del NDII para las diferentes especies presenta la misma tendencia en los casos en los que los valores de estos índices son muy pequeños y las diferencias entre ellos también, como ocurre con las especies de los diferentes Pinos, el Alerce, el bosque mixto, el Abeto Douglas, el Roble Pedunculano, las Chameciparis, las plantaciones de Frondosas, el Eucalipto Globulus, la Falsa Acacia y la Haya, siendo su rango de valores y su comportamiento bastante parecido. El resto de especies tienen cambios más bruscos en los valores de las diferentes fechas presentando rangos distintos.

En este caso también en la mayoría de especies los cambios entre las diferentes fechas son muy pequeños como se puede observar en la figura 95, muchas de las especies tienen valores entre los 0,001 y los -0,000002, presentando muchos de ellos valores negativos en este índice tras la tala. Entre estos, la especie que mayores diferencias presenta en sus valores es el Pino Radiata con valores medios de 0,0015 (un poco menores que para el NDII) y las especies que menores diferencias tienen serán el Roble Pedunculano y las plantaciones de Frondosas con unas diferencias mínimas de 0,00003.

Al igual que como ocurría con los otros índices, las especies como los Eucaliptos, las plantaciones de Coníferas, el Rebollo, el Cerezo, la Encina, la Secuoya y el Roble Americano presentan valores más altos en el NDII para todas las fechas como se puede observar en el gráfico. Será la Secuoya seguida del Roble Americano y de las plantaciones de Coníferas los que tengan los valores más altos del NDII con valores en torno a los 0,26-0,22, menores también que en el caso del NDVI y del NDII. Entre estos las especies que presentan mayores cambios en el descenso de los valores medios entre el 2016 y el 2017 son de nuevo el Roble Americano, y las las Coníferas con diferencias en torno a los 0,27.

Cabe destacar, que con este índice como se puede ver en el gráfico muchas especies toman valores negativos tras la tala para los valores medios durante el año 2017, también se observa como el rango de valores es más bajo que con los otros índices y las diferencias tras la tala de los valores medios también son menores.

8.3.4 SAVI

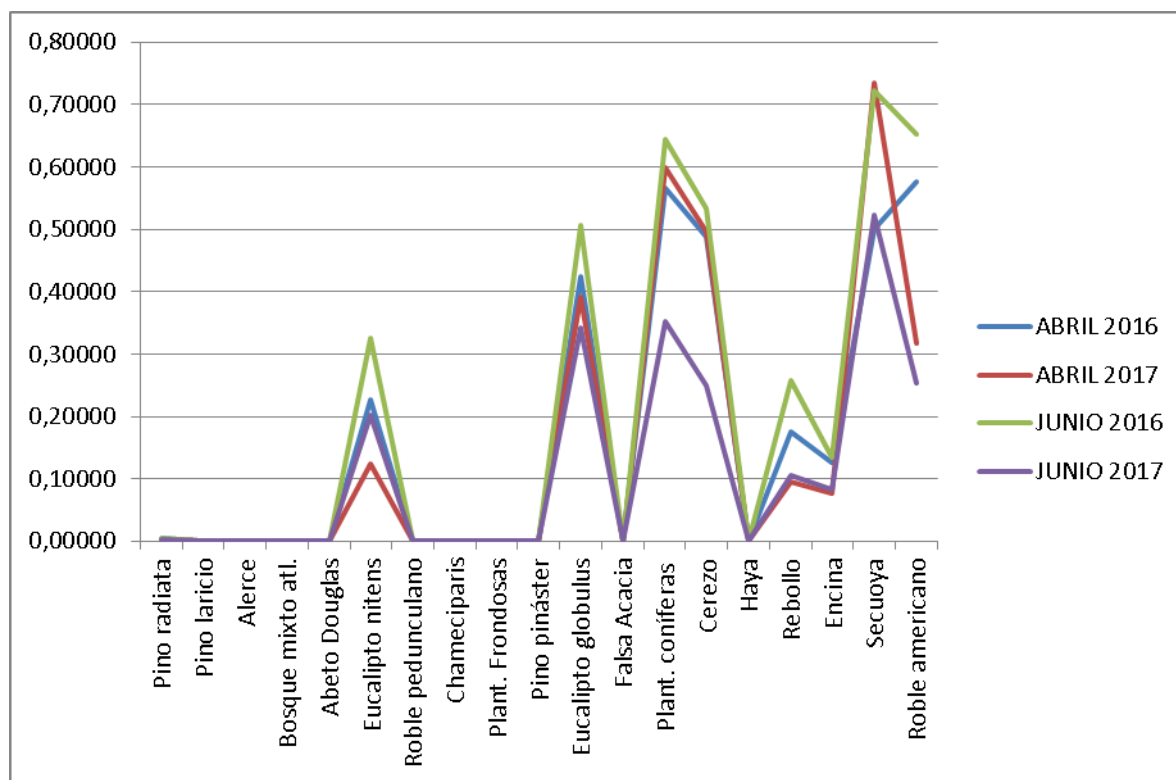


Figura 96 : Valores medios del SAVI por especies.

El comportamiento del SAVI para las diferentes especies sigue más o menos de nuevo la misma tendencia en las diferentes fechas, aunque su rango de valores sea diferente entre los diferentes meses. De nuevo en la mayoría de especies los cambios entre las diferentes fechas son muy pequeños, muchas de las especies tienen valores entre los 0,005 y los 0,00004, siendo como en el resto de IV el Pino Radiata la especie que mayores diferencias presenta con valores medios de 0,0029 (Los valores más altos en comparación con el resto de IV). Las especies que menores diferencias presentan entre estos ahora serán el Roble Pedunculano y las Plantaciones de Frondosas con unas diferencias de 0,00004.

Al igual que como ocurría con el resto de IV analizados anteriormente, las especies como los Eucaliptos, las plantaciones de Coníferas, el Rebollo, el Cerezo, la Encina, la Secuoya y el Roble Americano presentan valores más altos en el SAVI para todas las fechas como se puede observar en el gráfico (Fig. 96). Serán como en el caso del NDII, la Secuoya seguida del Roble Americano y de las plantaciones de Coníferas los que tengan valores más altos con valores en torno a los 0,72-0,64 ,valores muy superiores que el resto de IV. Entre estos las especies que presentan mayores cambios en el descenso de los valores medios entre el 2016 y el 2017 son de nuevo el Roble Americano, las Coníferas y el Cerezo con diferencias en torno a los 0,39-0,28.

En general se observa la misma tendencia entre las especies entre este índice, el NDVI y el RENDVI siendo el rango de valores y las diferencias entre los valores medios para el SAVI mayores

8.4 ANEXO 4: ESTUDIO DETALLADO DE LOS ÍNDICES POR PENDIENTES

En este anexo se realizará un análisis más exhaustivo de los resultados obtenidos al analizar los diferentes IV en función de las pendientes.

8.4.1 NDVI

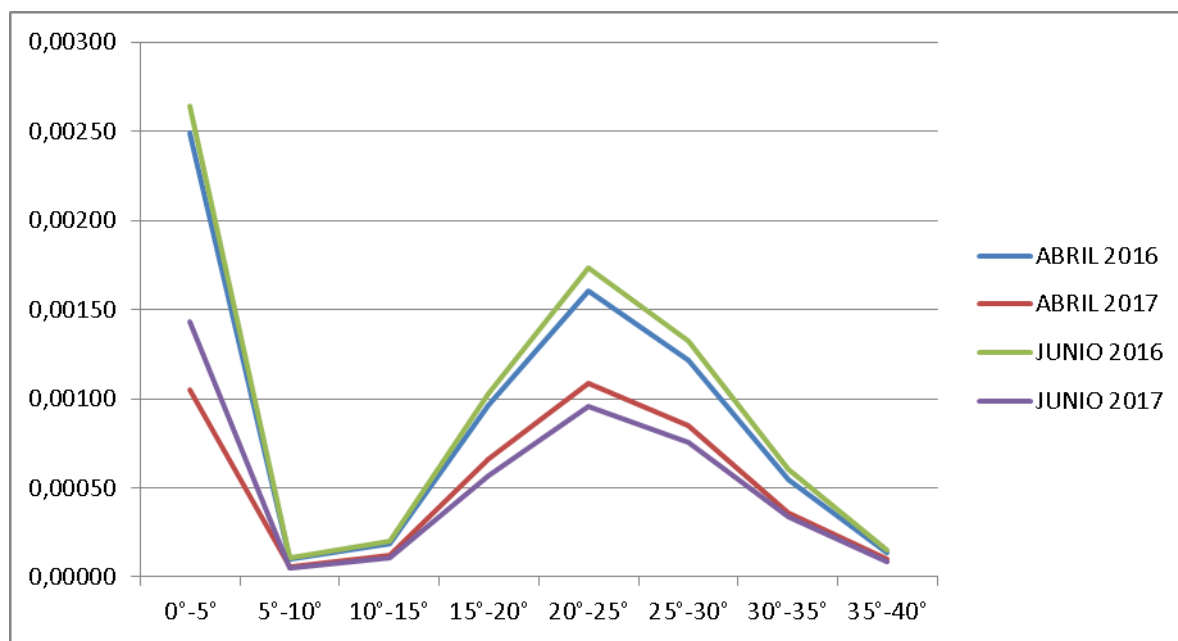


Figura 97 : Valores medios del NDVI por pendientes.

El comportamiento del NDVI para las zonas de tala que se encuentran en terrenos con diferentes pendientes sigue la misma tendencia en las diferentes fechas, aunque su rango de valores sea diferente. Las zonas de planicie son las que tienen mayores valores para el NDVI con valores en torno a los 0,0026, seguidas de las zonas con inclinaciones entre los 20 y 25 grados en los que los valores ya descienden a los 0,0017. Se observa como las pendientes entre 5° y 10° son las que menores valores presentan en este índice con valores de 0,00005, seguidas de las zonas con mayor pendiente entre los 35° y 40° en los que los valores aumentan un poco pero siguen siendo muy bajos en torno a los 0,00009. A partir de los 10°-15° donde los valores del NDVI son bajos, se produce un ascenso del IV llegando a su segundo máximo entre los 20°-25°, después de llegar a este pico los valores del NDVI descienden según va aumentando la pendiente.

Si se observa las diferencias entre los valores del NDVI en las diferentes fechas del estudio, se ve que las mayores diferencias entre el mes de junio de 2016 donde los valores de los índices de Pino Radiata son máximos y el mes de junio de 2017 donde tras la tala los valores son mínimos, se dan para las zonas más llanas donde la pendiente no supera los 5° teniendo unas diferencias máximas de 0,0012 y las menores diferencias en cambio en las zonas con mayores pendientes no superando estas los 0,000064 entre 2016 y 2017.

Por lo que como se puede observar, la tendencia general salvo en la zona de planicie donde los valores son máximos, es ir aumentando el valor de este índice desde los 5° a los 20°-25° y de ahí descender según aumenta la pendiente hasta los 40°.

8.4..1 RENDVI

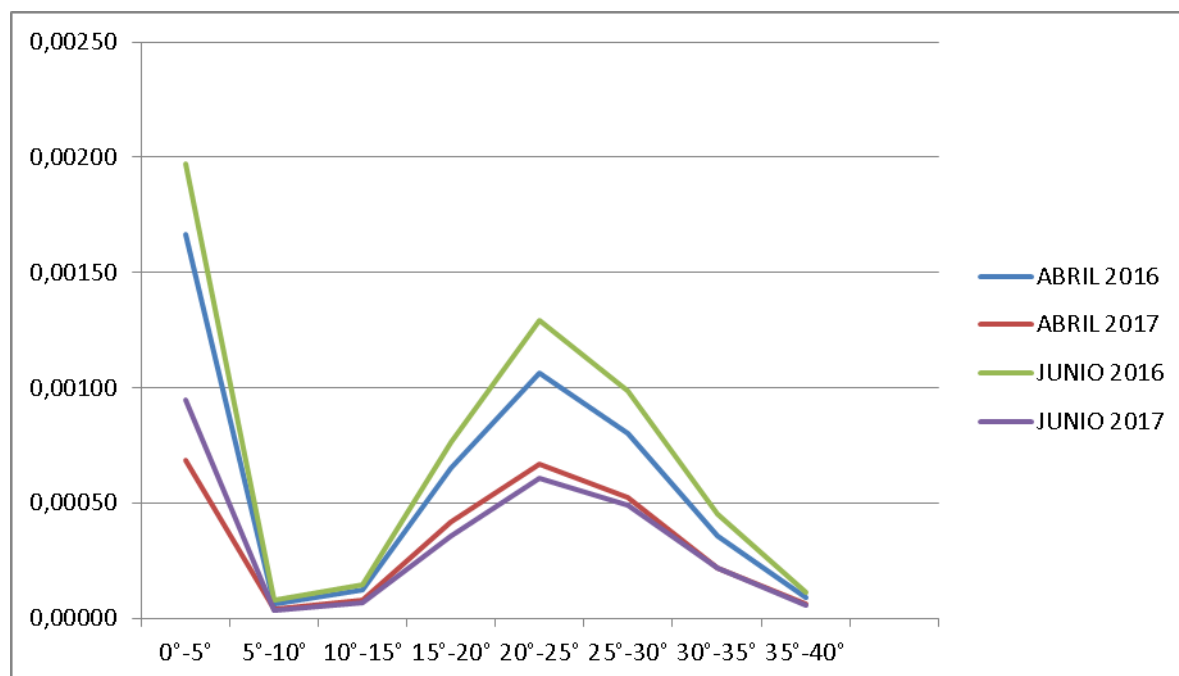


Figura 98: Valores medios del RENDVI por pendientes.

El comportamiento del RENDVI para las zonas de tala que se encuentran en terrenos con diferentes pendientes es muy similar al del NDVI, siguiendo la misma tendencia en las diferentes fechas, aunque su rango de valores sea diferente. Las zonas de planicie al igual que antes, son las que tienen mayores valores para el NDVI con valores en torno a los 0,0019, seguidas de las zonas con inclinaciones entre los 20 y 25 grados en los que los valores ya descienden a los 0,0013, en ambos casos estos máximos descienden en comparación con los valores que se daban en el NDVI. Se observa como las pendientes entre 5° y 10° son las que menores valores presentan en este índice con valores de 0,00003, las zonas con mayor pendiente entre los 35° y 40° también tienen en este caso valores bajos en torno a los 0,00006 en todos los casos todos estos mínimos son más bajos que los mínimos del NDVI.

Si se observa las diferencias entre los valores del RENDVI en las diferentes fechas del estudio, se ve que las mayores diferencias entre el mes de junio de 2016 donde los valores de los índices de Pino Radiata son máximos y el mes de junio de 2017 donde tras la tala los valores son mínimos, se dan para las zonas más llanas donde la pendiente no supera los 5° teniendo unas diferencias máximas de 0,001 y las menores diferencias en cambio en las zonas con mayores pendientes no superando estas los 0,00005 entre 2016 y 2017. En este caso las diferencias son menores que en el NDVI,

Por lo que como se puede observar, la tendencia general de este índice se vuelve a repetir, de nuevo salvo en la zona de planicie donde los valores son máximos, es ir aumentando el valor de este índice desde los 5° a los 20°-25° y de ahí descender según aumenta la pendiente hasta los 40°.

8.4.3 NDII

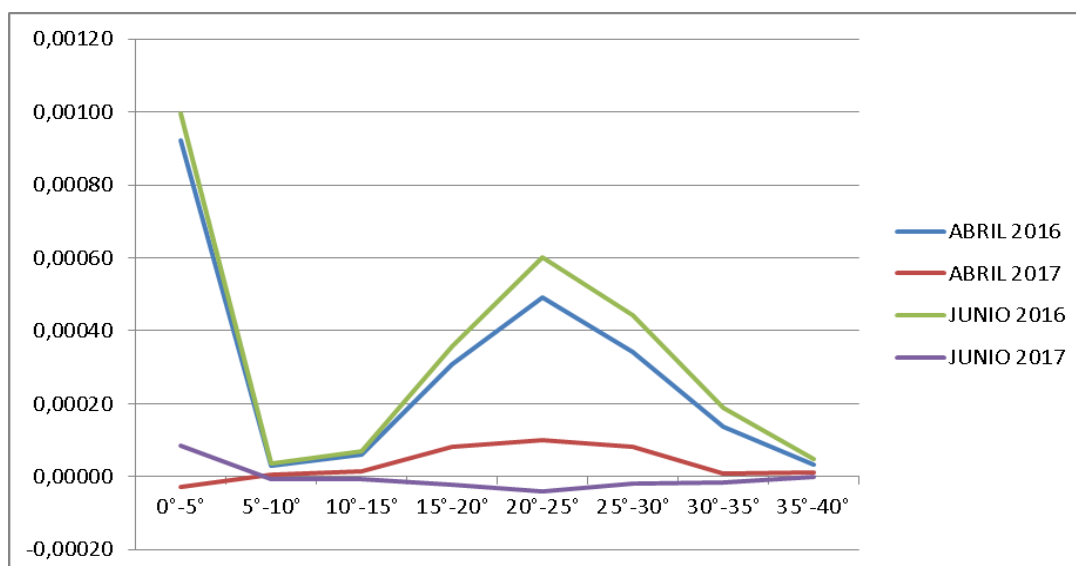


Figura 99: Valores medios del NDII por pendientes.

El comportamiento del NDII para las zonas de tala que se encuentran en terrenos con diferentes pendientes es muy similar al del NDVI y al del RENDVI para los meses de estudio durante 2016, siguiendo la misma tendencia, aunque su rango de valores sea diferente. En cambio en el 2017, se rompe con esa tendencia y se obtienen valores más bajos de los analizados para los niveles medios en los IV hasta ahora, teniendo valores negativos prácticamente en la mayoría de junio salvo en las zonas de planicie ente 0 y 5 grados, siendo estas las que presentan únicamente valores negativos en abril.

Las zonas de planicie al igual que antes, son las que tienen mayores valores para el NDII con valores en torno a los 0,001, seguidas de las zonas con inclinaciones entre los 20 y 25 grados en los que los valores ya descienden a los 0,0006, en ambos casos estos máximos descienden en comparación con los valores que se daban en el NDVI y en el RENDVI. Se observa como en este caso los valores mínimos en las pendientes cambian siendo las pendientes entre 20° y 25° las que menores valores presentan en este índice con valores negativos de -0,00004 dándose los valores más bajos entre los IV analizados hasta ahora. en todos los casos todos estos mínimos tras la tala en 2017 para los meses de abril y junio son más bajos que los mínimos de los diferentes IV analizados hasta ahora, siendo los máximos también inferiores.

Si se observa las diferencias entre los valores del NDII en las diferentes fechas del estudio, se ve que las mayores diferencias entre el mes de junio de 2016 y de 2017, se dan para las zonas más llanas donde la pendiente no supera los 5° con diferencias en torno a los 0,0009 y las menores diferencias en cambio en las zonas de pendiente entre los 5 y los 10 grados con valores en torno a los 0,00004, seguidas de las zonas con mayores pendientes donde estos valores llegan a los 0,00005. En este caso las diferencias máximas y mínimas para los valores medios de este IV son menores que en el NDVI y el RENDVI.

Por lo que como se puede observar, la tendencia general de este índice se repite para los meses anteriores a la tala en 2016, de nuevo salvo en la zona de planicie donde los valores son máximos, va aumentando el valor de este índice desde los 5° a los 20°-25° y de ahí desciende según aumenta la pendiente hasta los 40°. La tendencia en abril de 2017 con valores mucho más inferiores es la misma, salvo en las zonas de planicie que presenta valores mínimos ahora. Y en junio de 2017 cambia completamente se da el máximo valor de nuevo en las zonas de planicie pero luego va disminuyendo el valor de este índice desde los 5° a los 20°-25° y de ahí aumenta según aumenta la pendiente hasta los 40°, siendo negativos todos los valores salvo los de las zonas llanas. Es con este índice por tanto con el que se ven mayores cambios en el comportamiento de los IV tras la tala.

8.4.4 SAVI

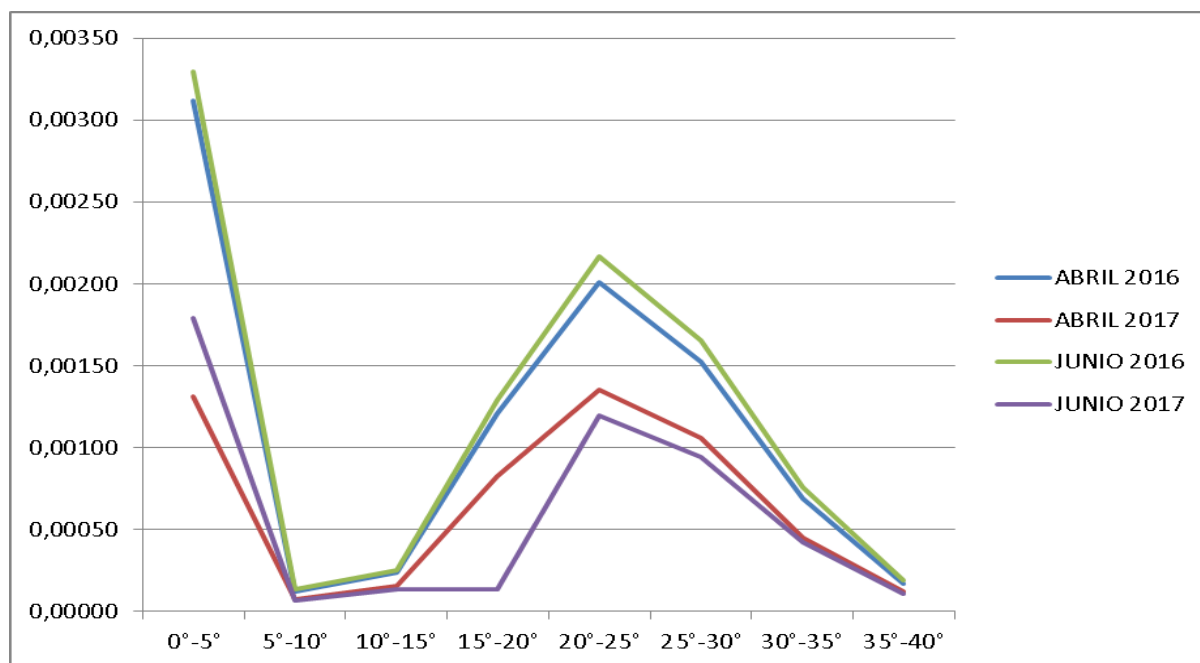


Figura 100: Valores medios del SAVI por pendientes.

El comportamiento del SAVI es similar al del NDVI y al del RENDVI, ya que sigue más o menos la misma tendencia, aunque su rango de valores sea diferente, produciéndose únicamente unos pequeños cambios en junio de 2017. Las zonas de planicie al igual que antes, son las que tienen mayores valores para el NDII con valores en torno a los 0,0033, seguidas de las zonas con inclinaciones entre los 20 y 25 grados en los que los valores ya descienden a los 0,0027, en ambos casos estos máximos son los valores más altos vistos en IV del estudio. Se observa como en este caso los valores mínimos en las pendientes se dan de nuevo en las pendientes entre los 5° y 10° con valores de 0,00006, seguidas después de las zonas de máxima pendiente con valores en torno a los 0,00011. Estos mínimos serán los mínimos más altos en comparación con el rango de valores de los diferentes IV analizados.

Si se observa las diferencias entre los valores del SAVI en las diferentes fechas del estudio, se ve que las mayores diferencias entre el mes de junio de 2016 y de 2017, se dan de nuevo para las zonas más llanas donde la pendiente no supera los 5° con diferencias en torno a los 0,0015 y las menores diferencias en cambio en las zonas de pendiente entre los 5 y los 10 grados con valores en torno a los 0,00007, seguidas de las zonas con mayores pendientes donde estos valores llegan a los 0,000085. En este caso las diferencias máximas y mínimas para los valores medios de este IV son las mayores también en comparación con los resultados obtenidos con los otros índices.

Por lo que como se puede observar, la tendencia general de este índice se repite para los meses anteriores a la tala en 2016, de nuevo salvo en la zona de planicie donde los valores son máximos, va aumentando el valor de este índice desde los 5° a los 20°-25° y de ahí desciende según aumenta la pendiente hasta los 40°. En junio de 2017, la tendencia cambia un poco puesto que el incremento de valores según aumenta la pendiente se estanca un poco entre los 15 y 20 grados aumentando muy poco en comparación con los valores obtenidos para el resto de fechas.